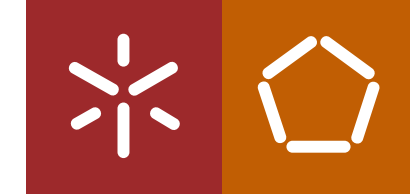


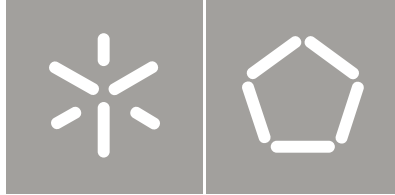


Vítor Daniel Cação Martins

Análise do comportamento de perfis metálicos enformados a frio com secção transversal em C e aberturas na alma

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Vítor Daniel Cação Martins

Análise do comportamento de  
perfis metálicos enformados a frio com  
secção transversal em C e aberturas na alma

Dissertação de Mestrado  
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação da  
Professora Maria Isabel Brito Valente

## **AGRADECIMENTOS**

Foram várias as pessoas que tornaram possível a realização desta dissertação. Agradeço desde já a todas elas.

Agradeço à minha orientadora, Prof<sup>a</sup> Isabel Valente, pelo tempo que disponibilizou ao longo da realização desta dissertação, pela partilha de conhecimentos, pela sua compreensão, orientação e conselhos transmitidos.

Agradeço à empresa EstufasMinho, S.A pelo fornecimento dos perfis metálicos necessários para a elaboração da dissertação e pelo fornecimento das amostras utilizadas na caracterização mecânica do aço.

Agradeço a todos os funcionários do Laboratório de Estruturas da Universidade do Minho, pela ajuda prestada durante a realização dos ensaios experimentais.

Ao Petr Navratil, pela ajuda e tempo disponibilizado na realização da campanha experimental.

Ao Mohammed Mastali, pela sua ajuda, tempo disponibilizado e conselhos com utilização do Software Abaqus.

À minha família e amigos pelo apoio incondicional que prestaram, que contribuíram, em muito, para a conclusão desta dissertação.



## RESUMO

A utilização de perfis metálicos de parede esbelta enformada a frio na conceção e realização de estruturas metálicas tem aumentado rapidamente nos últimos anos, com aplicações nos diversos sectores da construção civil.

A presente dissertação é desenvolvida no seguimento do interesse manifestado por uma empresa nacional em produzir um perfil metálico de secção transversal em C com características inovadoras, para o qual é necessária a realização de um estudo numérico e experimental que permita caracterizar o seu comportamento estrutural. Procura-se estabelecer metodologias de dimensionamento e verificação de segurança de elementos estruturais metálicos enformados a frio com secção transversal em C e aberturas na alma, tendo em consideração esforços de compressão e de flexão.

Neste sentido, desenvolve-se uma ferramenta analítica para o cálculo das propriedades mecânicas da secção transversal e quantificação da sua capacidade resistente, efetua-se uma avaliação experimental de elementos estruturais submetidos a esforços de flexão e realiza-se uma simulação numérica não linear, com base no Método dos Elementos Finitos, dos elementos estruturais ensaiados experimentalmente.

Para o estudo analítico desenvolve-se uma ferramenta de cálculo que tem por base a metodologia proposta na parte 1-3 da EN 1993. Esta ferramenta permite quantificar as características mecânicas de três secções transversais tipo, e calcular a respetiva capacidade resistente à compressão e à flexão segundo o eixo de maior inércia.

Na avaliação experimental estudam-se elementos estruturais solicitados à flexão segundo o eixo de maior inércia e segundo o eixo de menor inércia com banzo maior à tração e à compressão. Para tal, realizam-se ensaios de flexão com dois tipos de perfis metálicos, com e sem aberturas na alma, de forma a avaliar a influência das aberturas existentes, identificar os modos de instabilidade condicionantes e quantificar parâmetros relevantes, como por exemplo a carga máxima.

Por fim, efetua-se uma simulação numérica não linear (material e geométrica) dos provetes testados experimentalmente à flexão, usando o Software Abaqus. Desenvolvem-se 6 modelos baseados em perfis com e sem aberturas na alma. Estas simulações são comparadas e calibradas com os resultados obtidos em ensaios experimentais. Nestas simulações numéricas não se tem em conta as imperfeições geométricas e as tensões residuais.

**Palavras-chave:** Perfis metálicos enformados a frio, secção transversal em C com aberturas na alma.

## **ABSTRACT**

The use of cold formed steel sections in the conception and construction of metallic structures has increased rapidly in the last years, with applications in several sectors of construction.

This thesis is developed following the interest expressed by a national company to produce metallic C cross sections with innovative features for which it is necessary to analyse their structural behaviour. Therefore, it was decided to perform a numerical and an experimental study to establish methods for the design and safety verification of cold formed steel profiles with C cross section and web openings.

In the following, an analytical tool is developed to calculate the mechanical properties and evaluate the bending and compressive strength of the cross sections analysed. Also, an experimental program is performed to evaluate the behaviour of the structural elements and a nonlinear numerical simulation, based in the Finite Element Method, is developed on the structural components experimentally tested.

The analytical study consists on the development of a tool that is based on the methodology proposed in part 1-3 of EN 1993. With this tool, it is possible to quantify the mechanical properties of three cross sections and to calculate their bending and compressive strength along the axis of highest inertia.

During the experimental campaign, structural elements submitted to bending stresses and compressive stresses are studied. Cross sections with and without web openings are tested, in order to evaluate the influence of the web openings on the structural behaviour. The buckling conditioning modes and the most relevant parameters, as the maximum load or deflection, are evaluated.

Finally, a nonlinear numeric simulation (material and geometry) is performed using Abaqus software, based on the tested samples. Six models are developed in profiles with and without web openings. These simulations are compared and calibrated with the results obtained during the experimental tests. Geometrical imperfections and residual stresses are not taken into account in the models developed.

**Keywords:** Cold formed steel profiles, cross-section in C with web openings.





## ÍNDICE GERAL

1. Introdução .....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Estrutura do trabalho .....	4
2. Estado do conhecimento .....	6
2.1 Características gerais .....	6
2.2 Caracterização geométrica e mecânica dos enformados a frio. ....	6
2.3 Vantagens e desvantagens dos perfis enformados a frio .....	8
2.4 Processo de fabrico .....	9
2.4.1 Influência do processo de fabrico nas propriedades mecânicas .....	11
2.5 Aplicações dos perfis enformados a frio .....	13
2.6 Comportamento estrutural .....	14
2.6.1 Estabilidade e equilíbrio .....	15
2.6.2 Modos de instabilidade .....	16
2.6.3 Modo de instabilidade local de placa .....	17
2.6.4 Modo de instabilidade distorcional .....	18
2.6.5 Modos de instabilidade globais .....	19
2.6.6 Interação entre os modos de instabilidade .....	20
2.7 Métodos de análise .....	21
2.8 Análise pós-encurvadura .....	22
2.8.1 Conceito de secção efetiva .....	23
2.9 Secções metálicas com aberturas .....	25
3. Desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo analítica .....	29
3.1 Estrutura da ferramenta .....	34
3.2 Propriedades do material .....	36
3.3 Propriedades brutas da secção .....	37
3.4 Propriedades efetivas – secções submetidas à compressão .....	45
3.5 Propriedades efetivas – secções submetidas à flexão segundo o eixo de maior inércia .....	49
3.6 Propriedades efetivas – secções submetidas ao esforço transversal .....	57

3.7	Resultados.....	58
4.	Avaliação experimental do comportamento à flexão de perfis metálicos enformados a frio com secção em C, e aberturas na alma.....	68
4.1	Previsão dos ensaios experimentais.....	69
4.2	Caracterização mecânica do aço.....	71
4.3	Identificação dos ensaios realizados nesta campanha experimental.....	74
4.4	Metodologia e instrumentação da campanha experimental.....	81
4.5	Preparação dos ensaios com solicitação segundo o eixo de maior inércia.....	83
4.6	Preparação dos ensaios com solicitação segundo o eixo de menor inércia.....	87
4.7	Resultados dos ensaios experimentais.....	89
4.7.1	Ensaio com solicitação segundo o eixo de maior inércia, yy.....	98
4.7.2	Ensaio com solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração, z1.....	109
4.7.3	Ensaio com solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão, z2.....	114
4.8	Comparações/análise dos resultados.....	118
4.8.1	Ensaio com solicitação segundo o eixo de maior inércia, yy.....	118
4.8.2	Ensaio com solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração, z1.....	120
4.8.3	Ensaio com solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão, z2.....	121
4.9	Comparação em regime elástico das inércias obtidas experimentalmente e analiticamente.....	122
5.	Simulação numérica em perfis enformados a frio submetidos à flexão, com secção em C e aberturas na alma.....	126
5.1	Considerações gerais.....	126
5.2	Não linearidade material e geométrica.....	128
5.3	Processo de análise.....	129
5.4	Configuração dos modelos e condições de fronteira.....	130
5.5	Malha e tipo de elemento.....	134
5.6	Resultados, comparação entre a campanha de ensaios experimentais e os modelos de métodos numéricos.....	138
5.6.1	Modelos com solicitação segundo o eixo de maior inércia, yy.....	138

5.6.2 Modelos com solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração, $z_1$ .....	141
5.6.3 Modelos com solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão, $z_2$ .....	144
6. Conclusões.....	147
6.1 Considerações finais .....	147
6.2 Desenvolvimentos futuros .....	151
Referência bibliográficas.....	153
Sites consultados.....	156
Anexos .....	157
Anexo A .....	157



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Evolução, no Reino Unido, das secções transversais em madres, secção em Z e C, ( Davies, 2000).....	3
Figura 2-1: Forma das secções transversais: a) secções abertas, b) secções abertas reconstituídas e c) secções fechadas reconstituídas, (EN 1993-1-3, 2006) .....	7
Figura 2-2: Secções transversais de chapas perfiladas enformadas a frio, (Veríssimo, 2008). .....	7
Figura 2-3: Três gerações de chapas perfiladas, (Gherzi et al., 2002).....	8
Figura 2-4: Montagem de um edifício, (Silvestre & Camotim, 2006). ....	9
Figura 2-5: Sequência de etapas para a laminagem a frio de uma secção em Z, (Silvestre & Camotim, 2006). ....	10
Figura 2-6: Sequência de etapas para a laminagem a frio de uma secção em C, (Silvestre & Camotim, 2006). ....	10
Figura 2-7: Etapas do processo Quinagem, (Silvestre & Camotim, 2006) .....	11
Figura 2-8: Variação da tensão de cedência, $f_y$ , ao longo de uma secção transversal, (Silvestre & Camotim, 2006).....	12
Figura 2-9: Influencia dos reforços no comportamento de uma secção, (Silvestre & Camotim, 2006). ....	12
Figura 2-10: Fenómenos de instabilidade local, (Silvestre & Camotim, 2006) .....	14
Figura 2-11: Colapso da alma, (Silvestre & Camotim, 2006) .....	14
Figura 2-12: Exemplo clássico da esfera relativo ao conceito de estabilidade e equilíbrio: (a) equilíbrio estável, (b) equilíbrio instável e (c) equilíbrio neutro, (Reis & Camotim, 2001). ....	15
Figura 2-13: Trajetória associada à instabilidade bifurcacional, (Reis & Camotim, 2001). ....	16
Figura 2-14: Modos de instabilidade de uma coluna com secção em C: a) instabilidade local de placa, b) instabilidade distorcional, c) instabilidade global por flexo-torção e d) instabilidade global por flexão, (Camotim & Dinis, 2011) .....	17
Figura 2-15: Carga crítica versus comprimento para o caso de uma coluna, adaptado ao EN 1993-1-3 (2006).....	19
Figura 2-16: a) Configuração da secção transversal das secções C1 e C2. b) Dimensões das secções transversais C1 e C2, adaptado a Dinis et al. (2007). ....	20

Figura 2-17: Relaciona a tensão crítica com o comprimento, para a colunas C1 e C2, (Dinis et al., 2007).....	20
Figura 2-18: a) Modo distorcional da coluna C1. b) Interação entre o modo local de placa e o distorcional para a coluna C2, (Dinis et al., 2007).....	21
Figura 2-19: Método de discretização: a) com elementos e b) com faixas finitas, (Prola, 2001).....	22
Figura 2-20: Diagrama momento-curvatura, (Silvestre & Camotim, 2006) .....	23
Figura 2-21: a) Placa submetida a uma compressão uniaxial uniforme com os bordos simplesmente apoiados. b) Largura efetiva, (Silvestre & Camotim, 2006) .....	24
Figura 2-22: a) Diferença entre secção bruta e secção efetiva, (Silvestre & Camotim, 2006) .....	24
Figura 2-23: Função de redução $f$ , (Szabo & Dubina, 2004) .....	26
Figura 2-24: Representação das áreas das furações e da área do elemento, (Almeida, 2009) .....	27
Figura 3-1: Representação esquemática das furações tipo existentes nos perfis em estudo: a) furação correspondente aos perfis de EMC 90x1.2, EMC 90x1.5 e EMC 120x1.5 e b) furação correspondente aos perfis de EMC 150x1.5, EMC 200x2, EMC 200x2.5, EMC 250x2.5 e EMC 300x2.5. ....	30
Figura 3-2: Projetor de perfis PV-350 utilizado nas medições dos raios internos dos perfis analisados. ....	32
Figura 3-3: Exemplo relativo à medição do perfil EMC 200x2: a) posicionamento do perfil sobre o projetor e b) leitura da medição do raio interno. ....	32
Figura 3-4: Identificação das secções para análise num troço do perfil EMC 90x1.5: a) secção de alma cheia e b) secção com abertura na alma de máxima amplitude .....	33
Figura 3-5: Troços do perfil EMC 90x1,5: a) perfil sem aberturas, b) perfil com aberturas e c) perfil com aberturas e bordo reentrante ao longo das aberturas.....	33
Figura 3-6: Excerto de uma folha de cálculo com as variáveis de entrada referentes às propriedades do material. ....	37
Figura 3-7: Parâmetros de entrada referentes à secção transversal: a) secção sem abertura e b) excerto da folha de cálculo com os parâmetros de entrada.....	38
Figura 3-8: Parâmetros de entrada referentes à secção transversal: a) secção com abertura e b) excerto da folha de cálculo com os parâmetros de entrada.....	38

Figura 3-9: Parâmetros de entrada referentes à secção transversal: a) secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura e b) excerto da folha de cálculo com os parâmetros de entrada.....	39
Figura 3-10: Ponto intermédio do canto (EN 1993-1-3, 2006) .....	40
Figura 3-11: Exemplo para a ilustração das larguras nominais (EN 1993-1-3, 2006) .....	42
Figura 3-12: Eixos de referência para a definição do centro de gravidade. ....	43
Figura 3-13: Variáveis utilizadas na ferramenta para a definição da secção efetiva: a) secção sem abertura, submetida à compressão e b) secção com abertura, submetida à compressão. ....	46
Figura 3-14: Variáveis utilizadas na ferramenta para a definição da secção efetiva na secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, submetida à compressão..	48
Figura 3-15: Representação esquemática do parâmetro $Z_{nr}$ , referente à mudança de centro de gravidade, para o caso de uma flexão positiva, em secções com e sem abertura.....	50
Figura 3-16: Variáveis utilizadas na ferramenta para a definição da secção efetiva: a) secção sem abertura, submetida à flexão segundo o eixo de maior inércia e b) secção com abertura, submetida à flexão segundo o eixo de maior inércia.....	51
Figura 3-17: Representação esquemática: a) zona reentrante assumida como totalmente efetiva na ferramenta de cálculo, para flexão positiva e b) parametro $Z_{nr}$ , referente à mudança do centro de gravidade, para flexão positiva.....	54
Figura 3-18: Variáveis utilizadas para a definição da secção efetiva. Secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, submetida à flexão positiva segundo o eixo de maior inércia. ....	55
Figura 3-19: Representação dos parâmetros $h_w$ e $\Phi$ (EN 1993-1-3, 2006). ....	57
Figura 4-1: Sistema estrutural adotado nos ensaios de flexão.....	70
Figura 4-2: Diagramas de esforços – Ensaio de flexão: a) diagrama de esforço transversal e b) diagrama de momento fletor. ....	70
Figura 4-3: Dimensões dos provetes ensaiados.....	71
Figura 4-4: Representação das secções transversais onde se efetuam as medições. ....	72
Figura 4-5: Aspeto dos provetes após ensaiados. ....	73
Figura 4-6: Alçado do ensaio tipo 90×1.5_Fyy_Furos (dimensões em mm). ....	75
Figura 4-7: Alçado do ensaio tipo 90×1.5_Fyy_Liso (dimensões em mm):a) esquema representativo e b) modelo experimental.....	75
Figura 4-8: Alçado do ensaio tipo 90×1.5_Fz1_Furos (dimensões em mm). ....	76

Figura 4-9: Alçado do ensaio tipo 90×1.5_Fz1_Liso (dimensões em mm). ....	76
Figura 4-10: Alçado do ensaio tipo 90×1.5_Fz2_Furos (dimensões em mm): a) esquema representativo e b) modelo experimental. ....	77
Figura 4-11: Alçado do ensaio tipo 90×1.5_Fz2_Liso (dimensões em mm). ....	77
Figura 4-12: Alçado do ensaio tipo 150×1.5_Fyy_Furos (dimensões em mm). ....	78
Figura 4-13: Alçado do ensaio tipo 150×1.5_Fyy_Liso (dimensões em mm). ....	78
Figura 4-14: Alçado do ensaio tipo 150×1.5_Fz1_Furos (dimensões em mm): a) esquema representativo e b) modelo experimental. ....	79
Figura 4-15: Alçado do ensaio tipo 150×1.5_Fz1_Liso (dimensões em mm). ....	79
Figura 4-16: Alçado do ensaio tipo 150×1.5_Fz2_Furos (dimensões em mm). ....	80
Figura 4-17: Alçado do ensaio tipo 150×1.5_Fz2_Liso (dimensões em mm). ....	80
Figura 4-18: Chapa metálica utilizada sob o apoio. ....	80
Figura 4-19: Chapas transversais: a) na zona dos apoios e b) sob as cargas pontuais. ....	81
Figura 4-20: Posição dos furos ovalizados existentes na viga de carregamento. ....	83
Figura 4-21: Excentricidade correspondente à posição do centro de corte, medida em relação à linha média da secção transversal. ....	84
Figura 4-22: Pormenor da ligação utilizada para transmitir as cargas pontuais segundo a posição do centro de corte: a) vista frontal da ligação utilizada e b) posição do centro de corte na chapa saliente. ....	85
Figura 4-23: Posição dos transdutores de deslocamento verticais: a) perfis EMC 90×.5 e b) perfis EMC 150×1.5. ....	87
Figura 4-24: Transdutores para a medição dos deslocamentos horizontais: a) posição dos transdutores e b) chapas fixas ao provete para a medição dos deslocamentos horizontais ....	87
Figura 4-25: Posição dos transdutores de deslocamento verticais: a) perfis EMC 90×1.5 e b) perfis EMC 150×1.5. ....	88
Figura 4-26: Posição dos transdutores de deslocamento horizontais: a) flexão segundo z1 e b) flexão segundo z2. ....	88
Figura 4-27: Chapas fixas ao provete para a medição dos deslocamentos horizontais. ....	89
Figura 4-28: Representação esquemática, do sentido positivo e negativo para os deslocamentos horizontais. ....	98



Figura 4-29: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão, para os provetes do tipo 90x1.5_Fyy_Furos.....	99
Figura 4-30: Relação entre força e deformação horizontal nos provetes do tipo 90x1.5_Fyy_Furos: a) transdutor 125477 e b) transdutor 125480.....	101
Figura 4-31: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão, para os provetes do tipo 90x1.5_Fyy_Liso.....	102
Figura 4-32: Relação entre força e deformação horizontal nos provetes do tipo 90x1.5_Fyy_Liso: a) transdutor 125477 e b) transdutor 125480.....	103
Figura 4-33: Pormenores referentes à rotura da ligação entre a chapa transversal sobre o apoio e o perfil: a) provete P4 e b) provete P6.....	104
Figura 4-34: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão, para os provetes do tipo 150x1.5_Fyy_Furos.....	104
Figura 4-35: Relação entre força e deformação horizontal nos provetes do tipo 150x1.5_Fyy_Furos: a) transdutor 125477 e b) transdutor 125480.....	106
Figura 4-36: Pormenor relativo à torção observada no provete P2 do tipo 150x1.5_Fyy_Furos.....	106
Figura 4-37: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão, para os provetes do tipo 150x1.5_Fyy_Liso.....	107
Figura 4-38: Relação entre força e deformação horizontal nos provetes do tipo 150x1.5_Fyy_Liso: a) transdutor 125477 e b) transdutor 125480.....	108
Figura 4-39: Torção observada no provete P1 do tipo 150x1.5_Fyy_Liso.....	108
Figura 4-40: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão, para os provetes do tipo 90x1.5_Fz1_Furos.....	109
Figura 4-41: Relação entre força e deformação horizontal nos provetes do tipo 90x1.5_Fz1_Furos.....	110
Figura 4-42: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão, para os provetes do tipo 90x1.5_Fz1_Liso.....	111
Figura 4-43: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão, para os provetes do tipo 150x1.5_Fz1_Furos.....	112
Figura 4-44: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão, para os provetes do tipo 150x1.5_Fz1_Liso.....	113

Figura 4-45: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão: a) provetes do tipo 90×1.5_Fz2_Furos e b) provetes do tipo 90×1.5_Fz2_Liso. ....	115
Figura 4-46: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão: a) provetes do tipo 150×1.5_Fz2_Furos e b) provetes do tipo 150×1.5_Fz2_Liso. ....	117
Figura 5-1: Relação entre a tensão, $\sigma$ e a extensão, $\epsilon$ utilizada para descrever o comportamento do material.....	129
Figura 5-2: Cargas externas e internas num corpo, (versão 6.11 do Abaqus, 2011).....	130
Figura 5-3: Pormenor relativo aos deslocamentos longitudinais que foram impedidos, modelo 90×1.5_Fyy_Furos. ....	130
Figura 5-4: Perfil sem aberturas ao longo da alma.....	131
Figura 5-5: Perfil com aberturas e bordo reentrante ao longo da abertura.....	131
Figura 5-6: Pormenor da ligação entre a chapa saliente e o perfil para o modelo 90×1.5_Fyy_Furos. ....	132
Figura 5-7: Condições de fronteira e condições de aplicação da carga para o modelo 90×1.5_Fyy_Furos. ....	133
Figura 5-8: Condições de fronteira e condições de aplicação da carga para o modelo 90×1.5_Fz1_Furos.....	133
Figura 5-9: Condições de fronteira e condições de aplicação da carga para o modelo 90×1.5_Fz2_Furos.....	134
Figura 5-10: a) Elemento S4R. b) Pontos de integração através da espessura do elemento (versão 6.11 do Abaqus, 2011).....	135
Figura 5-11: Efeito da integração reduzida. ....	135
Figura 5-12: Relações entre força e deformação vertical na secção de meio vão.....	137
Figura 5-13: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão para o modelo numérico e ensaios experimentais, no perfil 90×1.5_Fyy_Furos.....	139
Figura 5-14: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão para o modelo numérico e ensaios experimentais, no perfil 90×1.5_Fyy_Liso.....	140
Figura 5-15: Modos de instabilidade relativos a 90×1.5_Fyy_Liso: a) modelo numérico e b) modelo experimental P3. ....	141
Figura 5-16: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão para o modelo numérico e ensaios experimentais, no perfil 90×1.5_Fz1_Furos.....	142

Figura 5-17: Modos de instabilidade relativos a 90×1.5_Fz1_Furos : a) modelo numérico e b) modelo experimental P2.....	142
Figura 5-18: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão para o modelo numérico e ensaios experimentais, no perfil 90×1.5_Fz1_Liso .....	143
Figura 5-19: Modos de instabilidade relativos a 90×1.5_Fz1_Liso: a) modelo numérico e b) modelo Experimental P1 .....	143
Figura 5-20: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão para o modelo numérico e ensaios experimentais, no perfil 90×1.5_Fz2_Furos. ....	144
Figura 5-21: Modos de instabilidade relativos a 90×1.5_Fz2_Furos: a) modelo numérico e b) modelo experimental P2.....	145
Figura 5-22: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão para o modelo numérico e ensaios experimentais, no perfil 90×1.5_Fz2_Liso. ....	146
Figura 5-23: Modos de instabilidade relativos a 90×1.5_Fz2_Liso: a) modelo numérico e b) modelo Experimental P2. ....	146

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3-1: Dimensões da secção transversal dos perfis em estudo .....	29
Tabela 3-2: Dimensões das furações correspondentes aos perfis em estudo de acordo com a Figura 3-1. ....	31
Tabela 3-3: Resultados das medições dos raios internos .....	32
Tabela 3-4: Possíveis combinações que a ferramenta prevê. ....	34
Tabela 3-5: Parâmetros de entrada referentes às propriedades do material. ....	36
Tabela 3-6: Propriedades do material utilizado no presente estudo. ....	37
Tabela3-7: Características mecânicas da secção transversal bruta – secção sem abertura.....	43
Tabela 3-8: Características mecânicas da secção transversal bruta – secção com abertura.....	44
Tabela 3-9: Características mecânicas da secção transversal bruta – secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura.....	45
Tabela 3-10: Expressões analíticas referentes às variáveis utilizadas na ferramenta para a definição da secção efetiva com e sem abertura .....	47
Tabela 3-11: Características efetivas e capacidade resistente da secção transversal – secção sem/ com abertura .....	47
Tabela 3-12: Expressões analíticas referentes às variáveis utilizadas na ferramenta para a definição da secção efetiva com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura.....	48
Tabela 3-13: Características efetivas e capacidade resistente da secção transversal – secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura .....	49
Tabela 3-14: Expressões analíticas referentes às variáveis utilizadas na ferramenta para a definição da secção efetiva com e sem abertura. ....	51
Tabela 3-15: Características efetivas e capacidade resistente da secção transversal – secção sem abertura. ....	52
Tabela 3-16: Características efetivas e capacidade resistente da secção transversal – secção com abertura. ....	53
Tabela 3-17: Expressões analíticas referentes às variáveis utilizadas na ferramenta para a definição da secção efetiva com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura.....	55
Tabela 3-18: Características efetivas e capacidade resistente da secção transversal – secção com abertura de bordo reentrante ao longo da abertura. ....	56

Tabela 3-19: Características mecânicas das secções sem abertura, submetidas à compressão .....	59
Tabela 3-20: Características mecânicas das secções com abertura, submetidas à compressão .....	60
Tabela 3-21: Características mecânicas das secções com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, submetidas à compressão.....	61
Tabela 3-22: Características mecânicas das secções sem abertura, submetidas à flexão..	63
Tabela 3-23: Características mecânicas das secções com abertura, submetidas à flexão.	64
Tabela 3-24: Características mecânicas das secções com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, submetidas à flexão .....	66
Tabela 3-25: Esforço transverso resistente- secção sem abertura .....	67
Tabela 4-1: Identificação das dimensões provenientes da previsão do comportamento à flexão. ....	70
Tabela 4-2: Resultado da previsão para a campanha experimental com solicitação segundo o eixo de maior inércia. ....	70
Tabela 4-3: Dimensões das três secções transversais referentes à zona útil. ....	72
Tabela 4-4: Resultados dos ensaios de tração .....	73
Tabela 4-5: Designação da campanha de ensaios experimentais .....	74
Tabela4-6: Sequencia das tarefas mais importantes na realização dos ensaios experimentais.....	82
Tabela 4-7: Valores obtidos para a posição do centro de corte. ....	84
Tabela 4-8: Espessuras das chapas salientes .....	85
Tabela 4-9: Zonas condicionantes e modos de instabilidade para os ensaios com solicitação segundo o eixo de maior inércia, yy .....	90
Tabela 4-10: Zonas condicionantes e modos de instabilidade para os ensaios de solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração, z1 .....	93
Tabela 4-11: Zonas condicionantes e modos de instabilidade para os ensaios de solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão, z2 .....	95
Tabela 4-12: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 90x1.5_Fyy_Furos.....	100
Tabela 4-13: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 90x1.5_Fyy_Liso.....	102

Tabela 4-14: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 150×1.5_Fyy_Furos. ....	105
Tabela 4-15: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 150×1.5_Fyy_Liso. ....	107
Tabela 4-16: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 90×1.5_Fz1_Furos.....	110
Tabela 4-17: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 90×1.5_Fz1_Liso.....	111
Tabela 4-18: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 150×1.5_Fz1_Furos.....	113
Tabela 4-19: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 150×1.5_Fz1_Liso.....	114
Tabela 4-20: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 90×1.5_Fz2_Furos.....	116
Tabela 4-21: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 90×1.5_Fz2_Liso.....	116
Tabela 4-22: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 150×1.5_Fz2_Furos.....	117
Tabela 4-23: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 150×1.5_Fz2_Liso.....	118
Tabela 4-24: Valores médios dos resultados dos ensaios com solicitação segundo o eixo de maior inércia, yy.....	119
Tabela 4-25: Valores médios dos resultados dos ensaios com solicitação segundo o eixo de menor inércia, z1.....	121
Tabela 4-26: Valores médios dos resultados dos ensaios com solicitação segundo o eixo de menor inércia, z2.....	122
Tabela 4-27: Inércia analítica e a experimental- flexão segundo o eixo de maior inércia.....	124
Tabela 4-28: Inércia analítica e a experimental- flexão segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração .....	125
Tabela 4-29: Inércia analítica e a experimental- flexão segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão .....	125

Tabela 5-1: Propriedades do material .....	129
Tabela 5-2: Influência da dimensão do elemento .....	137
Tabela 5-3: Cargas máximas obtidas nos modelos numéricos e nos ensaios experimentais.. .....	146





## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Enquadramento**

Os perfis enformados a frio são elaborados a partir de chapas de reduzida espessura, em geral com proteção anti corrosão previamente garantida, permitindo obter secções com formas muito variadas. Estes perfis apresentam boas propriedades mecânicas e reduzidos gastos de material, (Reis et al., 2010).

A eficiência estrutural, expressa pela excelente relação entre resistência e peso, a possibilidade de fabricar economicamente elementos com uma grande variedade de formas geométricas e a versatilidade dos processos de fabrico constituem aspetos que suscitaram elevado interesse e contribuem para a sua aplicação em fins estruturais.

O “Specification for the Design of Light Gage Steel Structural Members” publicado em 1946, constitui uma publicação com as primeiras disposições regulamentares relativas ao comportamento estrutural deste tipo de elemento, tendo contribuído muito significativamente para o crescimento da utilização dos elementos enformados a frio em estruturas de engenharia civil.

Os perfis enformados a frio caracterizam-se por apresentarem espessura constante, elevada relação entre a resistência e peso e larga variedade de formas das secções transversais. Comparativamente com os elementos metálicos convencionais, distinguem-se pela sua esbelteza e baixa rigidez à torção, estando assim suscetíveis a diversos fenómenos de instabilidade, nomeadamente fenómenos de instabilidade local (local de placa e distorcional) e globais (por flexão, flexão-torção e torção).

Segundo Davies (2000), os principais desenvolvimentos associados à tecnologia dos perfis enformados a frio são: a tendência para a utilização de aços de alta qualidade com aumento de tensão de cedência; a utilização de formas da secção transversal mais complexas (ver Figura 1-1); a redução de espessura e aumento do número de reforços; melhor resistência à corrosão e melhor tecnologia associada aos processos de fabrico. Em particular, as secções transversais com aumento do número de reforços exigem um

tratamento mais sofisticado dos modos de instabilidade local, distorcional e a interação entre ambos. Com a evolução da tecnologia dos perfis enformados a frio, são necessários também desenvolvimentos em paralelo, relativos a modelos de cálculo e de projeto. Existe a necessidade de encontrar procedimentos práticos de projeto para responder a formas de secção que são cada vez mais complexas.

Por se tratar de um tema em crescente desenvolvimento, constituindo uma solução eficiente e económica em muitas aplicações e pelo facto da nova regulamentação europeia introduzir conceitos ainda pouco divulgados em Portugal, procura-se com este trabalho construir uma ferramenta de cálculo analítica que tem por base metodologias de dimensionamento e verificação de segurança de perfis enformados a frio com secção transversal em C e aberturas na alma, tendo em consideração esforços de compressão e de flexão.

Esta dissertação será desenvolvida no seguimento do interesse manifestado por uma empresa nacional em produzir um perfil metálico com características inovadoras, para o qual é necessária a realização de um estudo numérico e experimental que possa caracterizar o seu comportamento estrutural. Será realizada uma simulação numérica não linear, tendo por base um Software baseado no Método de Elementos Finitos.

Destacam-se alguns exemplos de estudos semelhantes que foram realizados recentemente. Wang e Zhang (2009) efetuaram uma análise experimental e numérica para avaliar a resistência à flexão de perfis enformados a frio com secção em C e três tipos de reforço. Os resultados experimentais demonstram que o bordo de reforço e o modo de encurvadura têm grande influência na resistência à flexão. Os testes numéricos foram realizados com o Software Ansys e os resultados obtidos mostram uma boa concordância com os resultados experimentais em termos de resistência à flexão e modos de encurvadura. Pham e Hancock (2010) efetuaram uma simulação numérica não linear, com base no Método de Elementos Finitos, usando o Software Abaqus em perfis enformados a frio de alta resistência e secção transversal em C. Foram estudados perfis submetidos a corte e à combinação entre flexão e corte. Os resultados obtidos demonstram que a simulação pode ser usada para prever cargas últimas e analisar o comportamento pós-encurvadura. Em Roure et al. (2011), foram analisados dois métodos alternativos ao experimental para perfis de “*pallet racking*” submetidos a compressão: o método analítico

com base na EN 1993-1-3:2006/AC:2009, que envolve a determinação da secção efetiva, e os métodos numéricos com base no Método de Elementos Finitos.



Figura 1-1: Evolução, no Reino Unido, das secções transversais em madres, secção em Z e C, ( Davies, 2000)

## 1.2 Objetivos

Neste projeto, pretende-se analisar o comportamento estrutural de perfis metálicos enformados a frio com secção transversal em C e aberturas na alma. Numa primeira fase, pretende-se descrever as metodologias de dimensionamento e verificação de segurança propostas na parte 1-3 da EN 1993, para elementos estruturais enformados a frio.

Na segunda fase, o objetivo consiste em construir uma ferramenta de cálculo analítica que permita quantificar as características mecânicas das secções transversais em estudo (área, inércia, módulo de flexão, etc.), tendo em consideração esforços atuantes de compressão e de flexão, considerando a totalidade da secção transversal e a secção transversal efetiva. A ferramenta a ser desenvolvida deve ser baseada nas metodologias de cálculo apresentadas na EN 1993-1-3 e deve ter em conta as características geométricas das secções (secção em C com aberturas ovalizadas uniformemente distribuídas ao longo do elemento estrutural e bordos reentrantes ao longo das aberturas) e as dimensões das secções propostas pela empresa fabricante.

Numa terceira fase, serão realizados alguns ensaios experimentais, em provetes preparados a partir dos perfis metálicos enformados a frio em estudo. Estes provetes serão fornecidos pela empresa fabricante. Os ensaios serão realizados com o propósito de analisar e validar o comportamento estrutural deste conjunto de perfis, comparando os resultados obtidos por via analítica e experimental.

Na quarta e última fase, pretende-se construir modelos numéricos, realizados a partir de um Software de cálculo estrutural que tem por base o Método dos Elementos Finitos (MEF). Nestes modelos, consideram-se as dimensões das secções transversais propostas pela empresa fabricante, as dimensões dos provetes preparados para os ensaios experimentais e as condições de ensaio materializadas em laboratório.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

O Capítulo 1 contempla a introdução ao tema desta dissertação. Faz-se uma apresentação geral dos perfis enformados a frio, expõem-se as metodologias seleccionadas e definem-se os objetivos que se pretendem cumprir em cada fase do trabalho.

O Capítulo 2 propõe uma revisão bibliográfica relativa aos perfis enformados a frio, apresentando-se as suas vantagens e desvantagens, os processos utilizados no seu fabrico, as principais aplicações e conceitos relativos ao comportamento estrutural, nomeadamente os modos de instabilidade. Expõe-se também o conceito de secção efetiva que é fundamental para o dimensionamento dos perfis enformados a frio, e algumas metodologias para abordar as secções com aberturas.

No Capítulo 3 expõem-se algumas metodologias de dimensionamento e verificação de segurança propostas na EN 1993-1-3 para elementos estruturais enformados a frio. Desenvolve-se uma ferramenta de cálculo, elaborada com base em expressões analíticas que permitem calcular as características mecânicas das várias secções transversais (secção sem abertura, secção com abertura e secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura). Considera-se a secção na sua totalidade e a secção efetiva, para esforços de compressão simples e esforços de flexão simples segundo o eixo de maior inércia e esforços transversos.

O Capítulo 4 aborda a avaliação experimental do comportamento à flexão de perfis metálicos enformados a frio com secção em C e aberturas na alma. Testam-se elementos estruturais solicitados à flexão segundo o eixo de maior inércia e também segundo o eixo de menor inércia, com banzo maior à tração e à compressão. Faz-se a apresentação/identificação dos ensaios realizados, e a análise e discussão dos resultados

experimentais obtidos, com identificação dos modos de instabilidade de cada provete, quantificação de cargas máximas e relação entre força e deformação.

No Capítulo 5 são efetuados estudos de simulação numérica não linear, com base no Método de Elementos Finitos, usando o Software Abaqus em elementos submetidos a flexão. Faz-se uma apresentação dos modelos construídos, da não linearidade material e geométrica considerada, das condições de fronteira admitidas e da malha e elemento tipo escolhidos. Analisam-se e apresentam-se os resultados obtidos efetuando-se uma comparação entre os resultados obtidos com os ensaios experimentais e com os modelos numéricos.

A dissertação termina com o Capítulo 6 que contém, sucintamente, as considerações finais ao estudo efetuado em perfis metálicos enformados a frio com aberturas na alma e propõem-se possíveis desenvolvimentos futuros no âmbito do tema abordado com este trabalho.

## **2. ESTADO DO CONHECIMENTO**

### **2.1 Características gerais**

O aço apresenta boas propriedades físicas e mecânicas, como a elevada resistência e ductilidade. Tais características proporcionam a concepção de peças esbeltas. A elevada esbelteza associada a uma elevada capacidade resistente tornam este tipo de solução estrutural muito competitiva na indústria da construção.

Na construção metálica existem três tipos de elementos estruturais em aço: perfis laminados a quente, perfis constituídos por chapas soldadas entre si e os perfis enformados a frio. Os aços mais utilizados na construção metálica são os aços laminados a quente, também designados por aços macios. Os perfis reconstituídos soldados são indicados quando se pretendem peças de secção variável e não disponível comercialmente. Os perfis enformados a frio apresentam diferenças relativamente aos perfis laminados a quente. São fabricados a partir de chapas esbeltas, em geral com proteção anti corrosão, permitindo obter secções com boas características mecânicas, nomeadamente a elevada relação entre resistência e peso, permitindo obter soluções económicas. Além disso proporcionam gastos reduzidos com o material e melhoram a durabilidade das estruturas face à corrosão.

O comportamento dos perfis enformados a frio é afetado pela possibilidade de ocorrência de fenómenos de instabilidade, devido à sua reduzida espessura e à baixa resistência à torção (em peças de secção aberta). Estes fenómenos de instabilidade devem ser corretamente analisados, para se proceder a um correto dimensionamento dos elementos estruturais e tirar partido da respetiva capacidade resistente.

### **2.2 Caracterização geométrica e mecânica dos enformados a frio**

Os elementos estruturais enformados a frio podem dividir-se em: perfis estruturais, painéis e chapas perfiladas. Os perfis estruturais apresentam secções de espessura constante, devido aos processos de fabrico, que consistem na dobragem de chapas à temperatura ambiente até se obter a forma desejada. Segundo Silvestre e Camotim (2006),

a espessura destas chapas varia, de forma geral, entre 0.5 mm e 5 mm. Segundo Veríssimo (2008), as configurações geométricas das secções mais comuns são em U, C, Z, “Hat” e “Rack”.

Estes perfis são normalmente empregues como madres, travessas e treliças para sistemas de suporte de coberturas e fachadas.

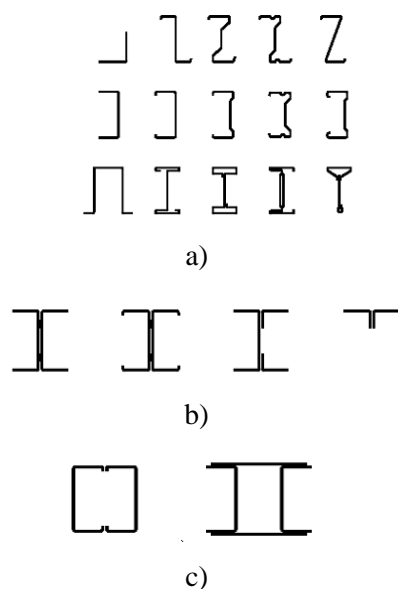


Figura 2-1: Forma das secções transversais: a) secções abertas, b) secções abertas reconstituídas e c) secções fechadas reconstituídas, (EN 1993-1-3, 2006).

Os painéis e chapas perfiladas são peças laminares de forma poligonal utilizados sobretudo no revestimento de fachadas, coberturas e também em lajes mistas. Constituem uma solução económica, porque podem ser utilizadas em diferentes vãos dependendo da geometria da secção transversal e da espessura da chapa. Segundo Silvestre e Camotim (2006), a espessura destas chapas varia normalmente entre 0.5 e 2 mm.



Figura 2-2: Secções transversais de chapas perfiladas enformadas a frio, (Veríssimo, 2008).

Segundo Gherzi et al. (2002), o desenvolvimento de chapas perfiladas tem sido caracterizado por três gerações de perfis. A primeira geração inclui perfis trapezoidais sem reforços (ver Figura 2-3 a), para a ligação de elementos secundários num comprimento inferior a 3 metros. Na segunda geração as folhas são trapezoidais com reforços na direção longitudinal (Figura 2-3 b) e podem apresentar comprimentos até 6 ou 7 metros. Por ultimo, na terceira geração as folhas trapezoidais apresentam reforços na direção transversal e longitudinal e podem vencer vãos até 12 metros (Figura 2-3 c).

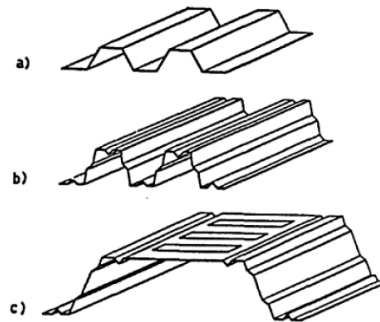


Figura 2-3: Três gerações de chapas perfiladas, (Gherzi et al., 2002).

Segundo Silvestre e Camotim (2006), no fabrico de elementos de aço enformados a frio é muito frequente a utilização de aços galvanizados com:

- ✓ Tensões de cedência,  $f_y$ , entre 220 e 500 N/mm<sup>2</sup>;
- ✓ Tensões ultimas,  $f_u$ , na gama de 300 a 750 N/mm<sup>2</sup>.

O processo de fabrico tem um efeito significativo nas características mecânicas do aço. Nomeadamente, verifica-se um aumento da tensão de cedência,  $f_y$ , e da tensão última,  $f_u$ , por endurecimento do aço nas zonas de dobra e uma diminuição da ductilidade do aço, (Silvestre & Camotim, 2006).

### 2.3 Vantagens e desvantagens dos perfis enformados a frio

Segundo Silvestre e Camotim (2006), as principais vantagens em relação aos perfis laminados a quente são:

- ✓ Elevada eficiência estrutural traduzida numa elevada relação entre a resistência e o peso;
- ✓ Possibilidade de utilizar inúmeras formas geométricas, adaptando-se a qualquer situação, aumentando assim a otimização estrutural;



- ✓ Fabrico com dimensões inferiores às mínimas padronizadas pelos laminados a quente, o que contribui para uma otimização estrutural, sobretudo para situações de carregamentos reduzidos. No caso dos perfis laminados a quente, é possível encontrar soluções estruturais sobredimensionadas devido às dimensões mínimas padronizadas.
- ✓ Tensões residuais inferiores, pelo facto de o fabrico se processar à temperatura ambiente;
- ✓ Elevada economia no armazenamento, transporte e manuseamento;
- ✓ Elevadas vantagens económicas devido à prefabricação em grande escala de subestruturas e subsequente montagem em obra (Figura 2-4):



Figura 2-4: Montagem de um edifício, (Silvestre & Camotim, 2006).

Segundo Veríssimo (2008), as principais desvantagens dos perfis de aço enformados a frio são:

- ✓ A ocorrência de fenómenos de instabilidade associados ao comportamento estrutural. No caso de perfis laminados a quente alguns fenómenos de instabilidade são inexistentes ou pouco relevantes, nomeadamente para cargas usuais.
- ✓ A necessidade de um cálculo da capacidade resistente das secções e dimensionamento de elementos estruturais que se verifica ser mais complexo do que noutros tipos de estruturas de aço;
- ✓ As relações geométricas cobertas por ensaios standards incluem secções relativamente tipificadas e com variação limitada.

## 2.4 Processo de fabrico

Para a produção de elementos estruturais enformados a frio são geralmente utilizados dois métodos: a laminagem a frio e a quinagem. Na laminagem a frio, a forma final necessária é obtida a partir da passagem da chapa sob uma sequência de rolos que lhe conferem esse

formato final. A quantidade de rolos utilizados depende da complexidade da forma final e da espessura da chapa utilizada. Numa chapa com espessura considerável pode ser necessária a passagem em vários rolos. O método é indicado quando se pretende produzir grandes quantidades, pois garante uma produção sistematizada. Por esse motivo, este método é mais económico quanto maior a quantidade a produzir de uma determinada secção.

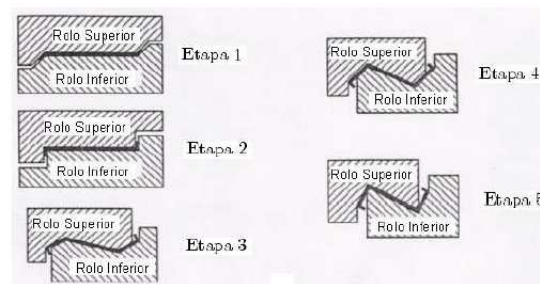


Figura 2-5: Sequência de etapas para a laminagem a frio de uma secção em Z, (Silvestre & Camotim, 2006).

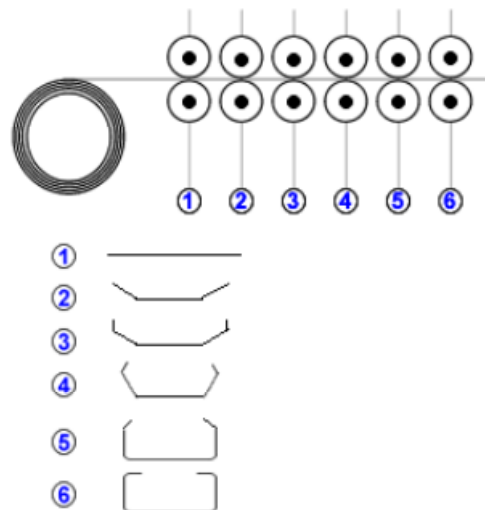


Figura 2-6: Sequência de etapas para a laminagem a frio de uma secção em C, (Silvestre & Camotim, 2006).

A quinagem é um processo que consiste na dobragem das chapas. É indicada para secções com configuração simples e está associada a pequenas quantidades de produção. Na presença de secções mais complexas, maior é o número de operações necessárias para conferir a forma pretendida.

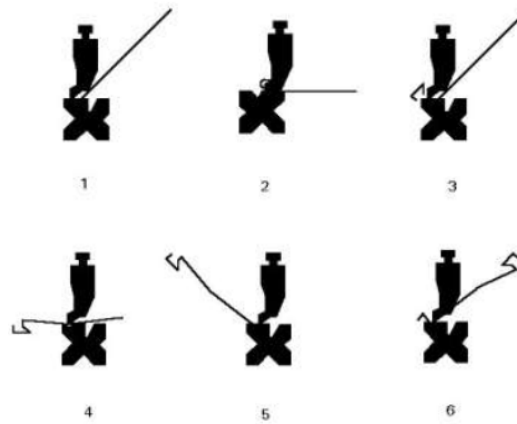


Figura 2-7: Etapas do processo quinagem, (Silvestre & Camotim, 2006).

### 2.4.1 Influência do processo de fabrico nas propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas das chapas provenientes do processo de enformagem a frio são consideravelmente diferentes das propriedades iniciais, nomeadamente nas zonas das dobras. Nestas zonas verifica-se um aumento da tensão de cedência,  $f_y$ , e da tensão última,  $f_u$ , e uma diminuição da ductilidade, devido ao processo de endurecimento do aço, (Gervásio et al., 2003). O aumento da tensão de cedência depende do processo de fabrico (laminagem a frio ou quinagem), do número de dobras e da espessura da chapa, (Silvestre & Camotim, 2006).

De acordo com a cláusula 3.2.2 da EN 1993-1-3, o aumento da tensão de cedência,  $f_y$ , do aço devido à enformagem a frio pode ser considerado no dimensionamento das secções transversais. É definida uma tensão de cedência média,  $f_{ya}$ , que pode ser determinada experimentalmente ou a partir das expressões, (2-1) e (2-2).

$$f_{ya} = f_{yb} + (f_u - f_{yb}) \times \frac{Knt^2}{A_g} \quad (2-1)$$

$$f_{ya} \leq \frac{(f_u + f_{yb})}{2} \quad (2-2)$$

Onde,  $t$  é a espessura do material,  $A_g$ , a área bruta da secção transversal,  $k$  é um coeficiente que depende do processo de fabrico, com os valores de 7 para o caso de

laminagem a frio e 5 para qualquer outro processo de enformagem e  $n$  o número de dobras a 90° da secção transversal.

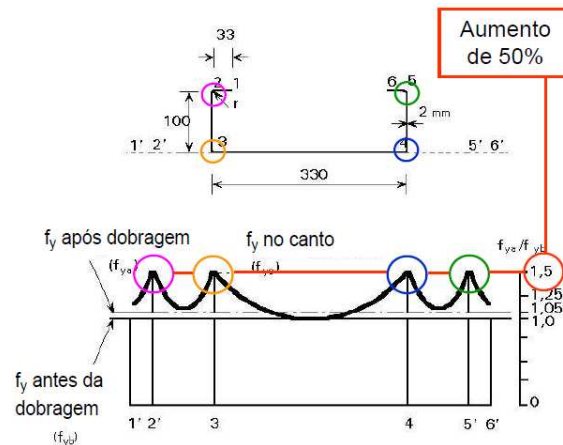


Figura 2-8: Variação da tensão de cedência,  $f_y$ , ao longo de uma secção transversal, (Silvestre & Camotim, 2006).

A existência de dobras na chapa, também designadas por reforços, contribuem para a estabilidade das secções transversais. A sua inclusão melhora o comportamento estrutural das secções aumentando a sua resistência à deformação local, (Silvestre & Camotim, 2006).

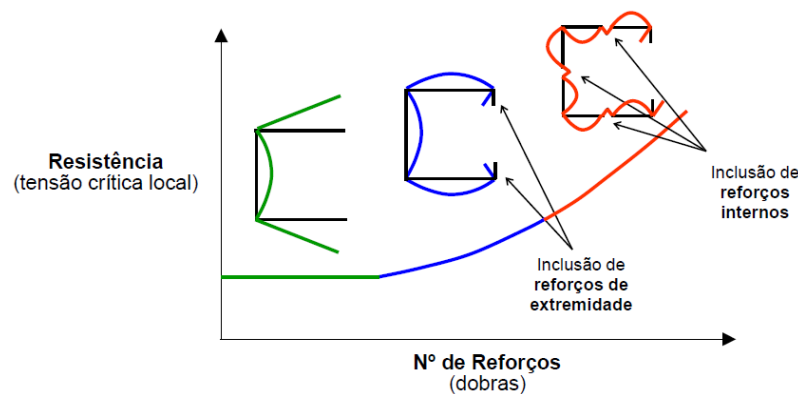


Figura 2-9: Influencia dos reforços no comportamento de uma secção, (Silvestre & Camotim, 2006).

As tensões residuais também têm uma significativa importância nas propriedades mecânicas dos aços. Estas tensões surgem devido ao processo de fabricação, transporte, montagem e sobrecargas ocasionais. Relativamente ao processo de fabricação, as tensões residuais resultam de efeitos térmicos e mecânicos. Os efeitos térmicos dizem respeito ao tratamento a elevadas temperaturas e ao arrefecimento após fundição. Os efeitos mecânicos contemplam os processos de enformagem a frio. Por isso, os efeitos

mecânicos são em geral os responsáveis pelas tensões residuais existentes nos perfis enformados a frio, (Silva, 1995).

A laminagem a frio produz tensões residuais que variam de acordo com a espessura da chapa. Em secções de espessura reduzida, como os enformados a frio, as tensões residuais são inferiores aos laminados a quente. No caso dos laminados a quente as tensões residuais são maioritariamente devidas a efeitos térmicos, em que as áreas à superfície tendem a arrefecer em primeiro lugar e ficam sujeitas a tensões de compressão, enquanto as zonas interiores ficam submetidas a tensões de tração, (Gherzi et al., 2002).

## **2.5 Aplicações dos perfis enformados a frio**

A enformagem a frio, deve-se em primeiro lugar às indústrias automóveis e aeronáutica. Na construção, a sua utilização começou na primeira metade do Século XX, com a sua aplicação em edifícios a partir de 1990. Em 1946 surgem as primeiras publicações que abordam disposições regulamentares e comportamento estrutural deste tipo de elementos pelo “Americam Iron and Steel Institute”.

Nos Estados Unidos da América, Canadá, Austrália e em vários países da Europa verifica-se uma tendência crescente para a utilização de estruturas de aço leve. Em Portugal, este tipo de estruturas tem sido utilizado essencialmente na substituição de perfis laminados a quente, com aplicação sobretudo em madres para coberturas. A sua utilização na construção de moradias também tem aumentado substancialmente, (Veríssimo, 2008).

Segundo Davies (2000), as principais aplicações de perfis enformados a frio são em sistemas para armazenamento, em madres e na construção de moradias. A sua utilização em sistemas de armazenamento e madres encontra-se bem desenvolvida. No caso das habitações, têm-se assistido a uma utilização crescente, mas o conhecimento não é tão desenvolvido. Relativamente às madres, num estudo sobre a evolução das secções transversais efetuado no Reino Unido, verifica-se um aumento na incorporação de dobras.

Devido ao reduzido peso, ao fácil manuseamento, tem-se verificado uma utilização crescente de secções enformadas a frio na reabilitação de edifícios existentes. Apresentam a vantagem de não sofrerem problemas relacionados com a durabilidade, porque, em geral apresentam proteção anti corrosão. Pelo contrário, materiais tipicamente utilizados como a madeira, são suscetíveis a fungos, humidades etc.

## 2.6 Comportamento estrutural

O comportamento dos perfis enformados a frio é caracterizado pelos seguintes fenómenos, (Silvestre & Camotim, 2006):

- ✓ Fenómenos de instabilidade local e global, devido à sua elevada esbelteza e à baixa rigidez à torção;
- ✓ Elevada deformabilidade à torção e ao empenamento, devido à baixa rigidez à torção (no caso de secções abertas) e ao facto de o centro de gravidade não coincidir com o centro de corte (leva ao aparecimento de momentos secundários);
- ✓ Colapso por esmagamento da alma, devido a forças concentradas, elevada esbelteza destes elementos e à difícil incorporação de reforços transversais.

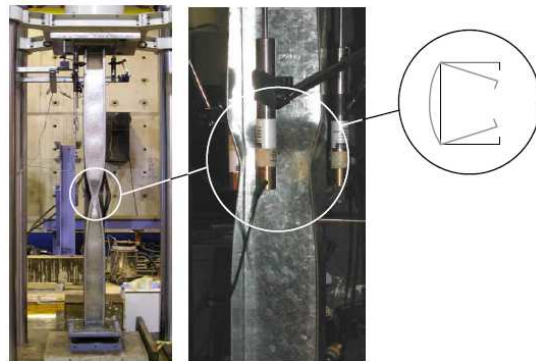


Figura 2-10: Fenómenos de instabilidade local, (Silvestre & Camotim, 2006).



Figura 2-11: Colapso da alma, (Silvestre & Camotim, 2006).

## 2.6.1 Estabilidade e equilíbrio

A configuração de equilíbrio e a avaliação da estabilidade de uma estrutura está relacionada com os deslocamentos sofridos devido a uma perturbação, causada por uma ação exterior. Se se afastar ligeiramente um corpo da sua posição de equilíbrio e o abandonar nessa nova posição, a configuração diz-se estável se o corpo retoma à posição inicial, neutra se o corpo mantém-se na sua nova posição e instável caso o corpo se afaste da sua posição inicial.

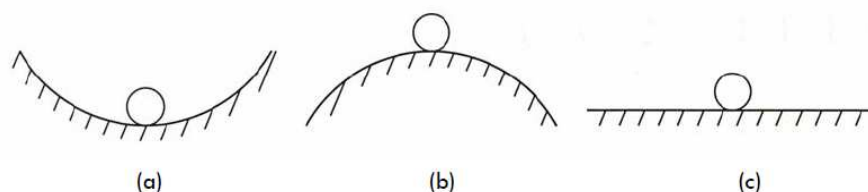


Figura 2-12: Exemplo clássico da esfera relativo ao conceito de estabilidade e equilíbrio: (a) equilíbrio estável, (b) equilíbrio instável e (c) equilíbrio neutro, (Reis & Camotim, 2001).

A instabilidade de uma estrutura corresponde à transição entre o equilíbrio estável e instável de uma determinada trajetória (relação entre carga e deslocamento). Numa estrutura submetida a carregamento, a relação entre carga e deslocamento evolui segundo uma determinada trajetória de equilíbrio até atingir uma carga que é designada de crítica. Após esta carga verifica-se uma configuração de equilíbrio instável. A instabilidade da estrutura pode surgir de dois modos distintos: instabilidade bifurcacional e a ocorrência de um ponto limite (instabilidade por *snap-trough*), (Reis & Camotim, 2001).

Os elementos abordados neste trabalho são vigas sujeitas a instabilidade bifurcacional, pelo que apenas se expõe este tipo de instabilidade. Sendo assim, a instabilidade bifurcacional, numa estrutura considerada “ideal”, sem imperfeições iniciais, caracteriza-se pela existência de uma trajetória de equilíbrio fundamental que se inicia na origem do diagrama carga-deslocamento, e apresenta um ponto de bifurcação que corresponde à transição do equilíbrio estável para instável da trajetória fundamental e uma trajetória de pós-encurvadura, (Reis & Camotim, 2001).

A trajetória de pós-encurvadura está associada a uma reserva de resistência, que deve ser considerada no dimensionamento, como no caso da instabilidade de placas e da

instabilidade local de barras de secção esbelta (perfis enformados a frio), (Veríssimo 2008).

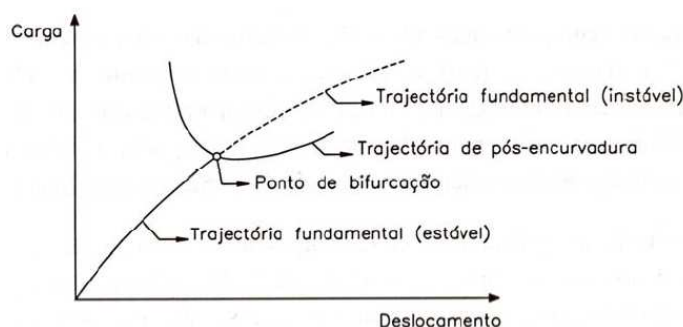


Figura 2-13: Trajetória associada à instabilidade bifurcacional, (Reis & Camotim, 2001).

Para a determinação da tensão crítica e da forma do modo de instabilidade (ponto de bifurcação), faz-se uma análise linear de estabilidade. Para uma análise do comportamento pós-encurvadura é necessário uma análise não linear de estabilidade, (Reis & Camotim, 2001).

## 2.6.2 Modos de instabilidade

Os perfis enformados a frio são caracterizados por uma elevada esbelteza, da qual resultam fenómenos de instabilidade, dos quais se destacam, os modos de instabilidade locais, como a distorção da secção transversal e a encurvadura local de placa, e os modos globais, como a encurvadura global. A ocorrência destes fenómenos deve-se ainda a uma baixa rigidez à torção e a uma elevada deformabilidade das secções. A baixa rigidez à torção deve-se, ao facto de as secções produzidas pelo processo de enformagem a frio serem maioritariamente monossimétricas ou mesmo assimétricas. Assim, o centro de corte deixa de coincidir com o centro de gravidade, o que obriga à consideração de momentos torsores secundários decorrentes da excentricidade entre o eixo de ação das cargas e o centro de corte. De referir ainda que a distorção está relacionada com a presença de reforços que, devido ao processo de fabrico, se caracterizam pelo endurecimento e aumento da tensão de cedência do aço. No entanto, estes reforços impedem a secção transversal de se deformar lateralmente, o que leva ao aparecimento de fenómenos de distorção, (Gervásio et al., 2003).



Como já foi sendo referido anteriormente, existem vários fatores que influenciam o comportamento deste tipo de secção. Além disso, os fenómenos de instabilidade não são independentes uns dos outros, existindo a possibilidade de ocorrência de modos mistos, que dificulta o processo de análise e de dimensionamento destes elementos. Em termos regulamentares esta complexidade levou à consideração de uma parte específica da EN 1993, dedicada ao dimensionamento e verificação de segurança destas secções metálicas, (Veríssimo, 2008).

Estes fenómenos de instabilidade, dependem do comprimento da barra, da forma e dimensões da secção transversal e das condições de fronteira (restrições aos deslocamentos e rotações que existem nas secções), (Veríssimo, 2008).

Por ultimo, os fenómenos de instabilidade podem ocorrer tanto em fase elástica como em fase elasto-plástica. Devido à elevada esbelteza característica destes perfis, estes fenómenos ocorrem maioritariamente em regime elástico, daí a importância de determinar a tensão crítica de bifurcação e de identificar o modo de instabilidade condicionante, em vez do estudo do comportamento pós-encurvadura, (Veríssimo, 2008).

Na Figura 2-14 encontram-se representados os modos de instabilidade: locais (local de placa, distorcional) e globais (por flexo-torção e por flexão) de uma secção em C.

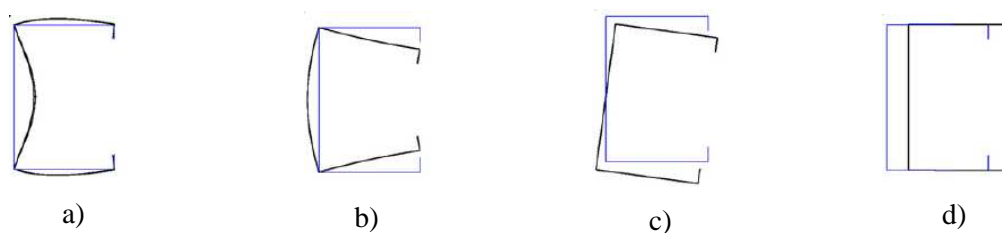


Figura 2-14: Modos de instabilidade de uma coluna com secção em C: a) instabilidade local de placa, b) instabilidade distorcional, c) instabilidade global por flexo-torção e d) instabilidade global por flexão, (Camotim & Dinis, 2011).

### 2.6.3 Modo de instabilidade local de placa

Os modos de instabilidade local de placa caracterizam-se por envolver, essencialmente, deformações das paredes do perfil, permanecendo o seu eixo na configuração indeformada. Este modo é particularmente sensível e crítico em perfis curtos. Os bordos longitudinais sofrem apenas rotações. A deformação das secções deve-se,

exclusivamente, à flexão das paredes internas. Exibem comprimentos de semi-onda da mesma ordem de grandeza da largura da placa, com configuração ondulada. As condições de fronteira não alteram significativamente o seu comportamento, apenas se verificam melhorias nas extremidades, (Veríssimo, 2008).

De acordo com a EN 1993-1-3, o dimensionamento de elementos enformados a frio é feito com base no método das secções efetivas. Este método considera a redução da resistência devido à encurvadura local através de uma redução da dimensão da secção transversal.

#### **2.6.4 Modo de instabilidade distorcional**

O estudo e a documentação deste modo de instabilidade são ainda recentes. Quanto à configuração deste modo de instabilidade, os bordos longitudinais internos da barra sofrem simultaneamente rotações e translações, exibindo comprimentos de onda 5 a 10 vezes superiores ao modo local de placa. O eixo da barra permanece indeformado. Comparativamente ao modo local de placa, o modo distorcional apresenta deslocamentos de empenamento elevados, nomeadamente nas zonas com reforços, e as condições de fronteira, contrariamente ao modo local de placa contribuem para a melhoria do comportamento, sobretudo as restrições ao empenamento nas secções extremas. Este modo de instabilidade encontra-se normalmente associado à presença de reforços, por exemplo, secções em C sem reforços de extremidade não apresentam modos distorcionais, (Veríssimo, 2008).

De salientar que existe alguma controvérsia na definição se o modo distorcional pode ou não ser considerado um modo local, visto que exhibe comprimentos de onda superiores ao modo local de placa. Neste trabalho considera-se um modo local, porque o eixo da barra permanece indeformado (característica dos modos locais).

De acordo com a EN 1993-1-3, a redução da resistência da secção devido à encurvadura por distorção é feita considerando uma redução da espessura do reforço.

## 2.6.5 Modos de instabilidade globais

Neste caso, os modos de instabilidade são caracterizados pela ocorrência de deformação do eixo da barra enquanto as secções transversais sofrem unicamente deslocamentos de corpo rígido no seu próprio plano (de um modo geral uma rotação e duas translações). Os modos globais podem ser devidos à flexão em torno do eixo de menor inércia (modo global de flexão) e flexão em torno do eixo de maior inércia combinado com torção (Modo global de flexão-torção), modos esses que já se encontram representados acima para o caso da secção em C. Para além desses, existem ainda os modos de instabilidade de torção pura em colunas com baixa rigidez de empenamento (por exemplo secção em T), (Veríssimo, 2008).

As condições de fronteira influenciam o seu comportamento, nomeadamente no número de comprimentos de onda. Estes modos são particularmente sensíveis para o caso de barras longas.

Na Figura 2-15, encontra-se representado um diagrama que relaciona a carga crítica com o comprimento de uma coluna. Nesta figura pretende-se apresentar a influência do comprimento das barras nos modos de instabilidade e a possibilidade de ocorrência de modos mistos. Na Figura 2-15 representa-se uma coluna com carga crítica  $C1$  e comprimento  $L1$ , pelo que existe a possibilidade de ocorrência do modo de instabilidade local de placa e do modo de instabilidade global. Trata-se apenas de um exemplo, isto porque, dependendo dos casos (geometria da secção transversal, condições fronteira etc), as curvas podem variar e apresentar outras formas bem como outros valores mínimos de carga crítica.

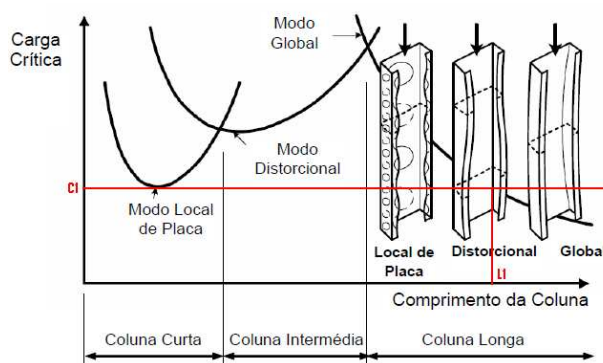


Figura 2-15: Carga crítica versus comprimento para o caso de uma coluna, adaptado ao EN 1993-1-3 (2006).

### 2.6.6 Interação entre os modos de instabilidade

A interação entre modos de instabilidade está relacionada com a ocorrência em simultâneo de mais do que um modo de natureza distinta. Os perfis de aço enformados a frio são suscetíveis a fenómenos de interação devido ao facto de utilizarem chapas de reduzida espessura. A ocorrência da interação entre os modos de instabilidade dificulta tanto a determinação da tensão crítica de bifurcação como o comportamento de pós-encurvadura, ou seja, o comportamento geometricamente não linear de um elemento estrutural, (Prola, 2001).

A Figura 2-17 relaciona a tensão crítica com o comprimento da coluna, para o caso de duas colunas com as características definidas na Figura 2-16. Com este exemplo pretende-se demonstrar a possibilidade de ocorrência da interação dos modos de instabilidade.

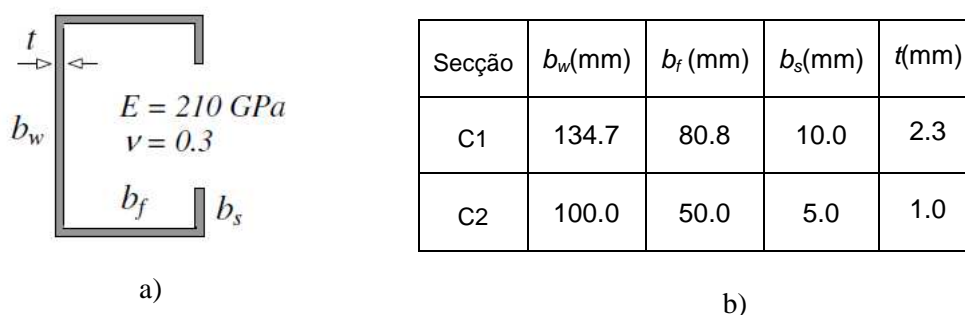


Figura 2-16: a) Configuração da secção transversal das secções C1 e C2. b) Dimensões das secções transversais C1 e C2, adaptado ao Dinis et al. (2007).

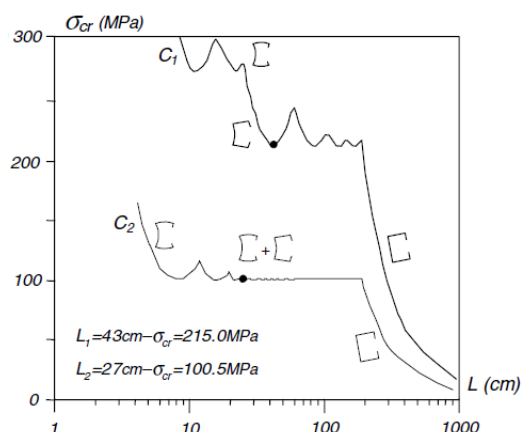


Figura 2-17: Relaciona a tensão crítica com o comprimento, para a colunas C1 e C2, (Dinis et al., 2007).

Ao longo do comprimento, observa-se as deformações da secção, correspondentes ao modo de instabilidade local, seguido o modo distorcional e por último os modos de instabilidade globais. Na coluna C1 para um comprimento de 43 cm, o fenómeno de instabilidade associado é o modo distorcional, que se encontra representado na Figura 2-18 a). Na coluna C2 para um comprimento de 27 cm, existe a interação entre o modo local de placa e o modo distorcional, representado na Figura 2-18 b).



Figura 2-18: a) Modo distorcional da coluna C1. b) Interação entre o modo local de placa e o distorcional para a coluna C2, (Dinis et al., 2007).

## 2.7 Métodos de análise

Os métodos que mais se destacam para a análise de estabilidade de perfis de parede fina são: (a) o Método dos Elementos Finitos, (b) o Método das Faixas Finitas e (c) implementações numéricas de formulações da Teoria Generalizada de Vigas.

- (a) No Método dos Elementos Finitos a estrutura é subdividida em geometrias mais simples e ligadas entre si por nós. No sistema discreto resultante, os graus de liberdade obtém-se por compatibilidade, a partir dos deslocamentos nodais dos vários elementos finitos (Prola, 2001). Segundo Davies (2000), o Método dos Elementos Finitos é o mais geral dos métodos numéricos e que fornece soluções que se regem nas equações diferenciais. Permitem acomodar uma grande variedade de formas das secções transversais e fenómenos de encurvadura. A principal desvantagem está no custo considerável, nomeadamente com o tempo gasto na preparação dos dados e no processamento, principalmente em problemas não-lineares.
- (b) O Método das Faixas Finitas na análise de secções de parede fina constitui uma ferramenta muito eficiente para estudar o comportamento à encurvadura de membros enformados a frio submetidos a compressão e flexão. Trata-se de um

método adequado para demonstrar os diferentes modos de instabilidade das secções de parede fina, (Hancock et al., 2001). A subdivisão da estrutura em “faixas finitas” exige que a geometria permaneça inalterada no sentido longitudinal, como por exemplo as barras prismáticas. Na Figura 2-19, ilustra-se a diferença na subdivisão de uma barra prismática de parede fina com secção em C, adotando o MEF e o MFF.



Figura 2-19: Método de discretização: a) com elementos e b) com faixas finitas, (Prola, 2001).

(c) Segundo Davies (2000), a Teoria Generalizada de Vigas é também aplicada a barras prismáticas, sendo por isso comparada ao Método das Faixas Finitas. No entanto, esta teoria é mais do que um método alternativo, e pode ser aplicado aos três modos de encurvadura (local de placa, distorcional e global), bem como, à interação entre modos de encurvadura. Em Davies e Leach (1994), apresentam-se os princípios básicos da Teoria Generalizada de Vigas e mostra-se como esta teoria pode ser utilizada para analisar secções enformadas a frio em que a distorção da secção transversal seja significativa.

## 2.8 Análise pós-encurvadura

O estudo do comportamento de pós-encurvadura, pode conduzir a um aumento da resistência, ou seja, a uma diferença significativa entre a carga crítica elástica obtida com base numa análise linear de estabilidade e a carga última de pós-encurvadura (análise não linear de estabilidade). Neste caso, encontra-se a instabilidade de placas e a instabilidade local de barras com secção de parede fina. No entanto, apesar de conduzir a um aumento da resistência, o respetivo estudo e análise é mais complexo que uma análise linear de estabilidade. A determinação precisa da trajetória de pós-encurvadura de uma barra

requer a utilização de métodos numéricos (como por exemplo o Método de Elementos Finitos), que podem ser mais ou menos sofisticados, (Veríssimo, 2008).

De acordo com Veríssimo (2008), pode afirmar-se, relativamente às secções transversais, que o modo de instabilidade local de placa apresenta uma significativa reserva de resistência, o modo de instabilidade global uma reduzida reserva de resistência e por último o modo distorcional apresenta uma resistência de pós-encurvadura intermédia (entre o modo local e o global). Quanto, aos modos globais de instabilidade, uma vez que apresentam uma reduzida reserva de resistência, a determinação da carga crítica de bifurcação (análise linear de estabilidade), fornece uma razoável estimativa da resistência da barra.

### 2.8.1 Conceito de secção efetiva

Como já foi referido anteriormente, o dimensionamento de elementos enformados a frio é feito com base no cálculo de secções efetivas. Está análise deve-se ao facto de os enformados a frio pertencerem à classe 4, isto é, corresponderem a secções transversais que não têm capacidade para atingir a sua resistência elástica, apresentando risco de enfunamento localizado. Para os perfis laminados a quente, que de um modo geral correspondem a secções da classe 1 e 2 (secções transversais com a capacidade de atingir a sua resistência plástica sem risco de enfunamento local), esta abordagem não é tão frequente.

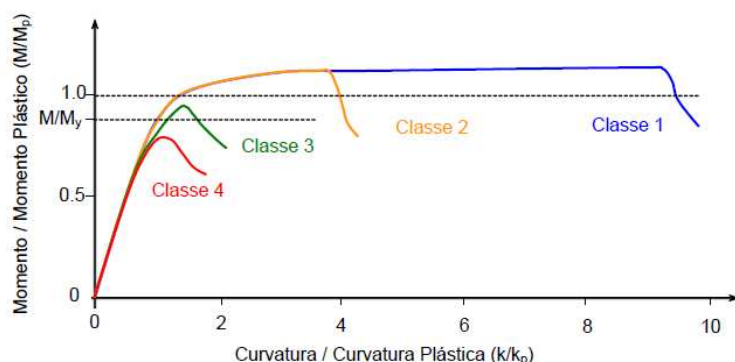


Figura 2-20: Diagrama momento-curvatura, (Silvestre & Camotim, 2006).

Considere-se uma placa submetida à compressão uniaxial uniforme e com todos os bordos simplesmente apoiados. Quando esta for submetida a uma tensão superior à crítica

(tensão que causa uma deformação irreversível na placa), verifica-se uma distribuição de tensões não linear, com valores baixos numa zona central e máximos ao longo dos bordos longitudinais (ver Figura 2-21). Para o dimensionamento, pode-se substituir o diagrama de tensões não uniforme por um diagrama uniforme, em que a tensão atuante é igual à tensão máxima, aplicada em zonas próximas dos bordos. Surge assim o conceito de largura efetiva.

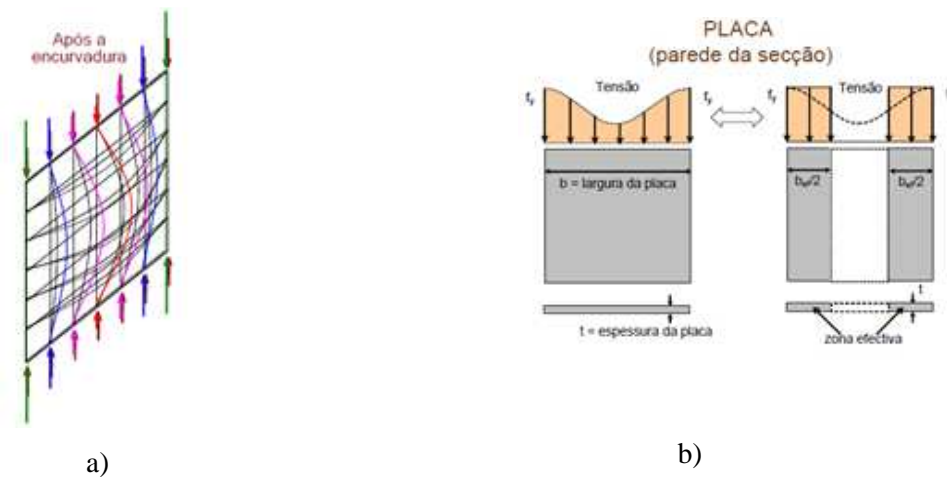


Figura 2-21: a) Placa submetida a uma compressão uniaxial uniforme com os bordos simplesmente apoiados. b) Largura efetiva, (Silvestre & Camotim, 2006).

A determinação da capacidade resistente é feita com base numa secção reduzida (secção efetiva), em vez da utilização das propriedades da secção bruta (área e inércia).

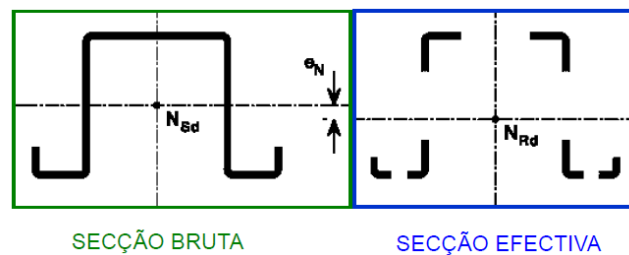


Figura 2-22: Diferença entre secção bruta e secção efetiva, (Silvestre & Camotim, 2006).

Este conceito de secção efetiva e de largura efetiva diz respeito à redução da resistência da secção transversal para o modo local de placa. Para o modo de instabilidade distorcional, essa redução de resistência é feita a partir de uma redução da espessura de reforço, que difere da metodologia citada neste ponto.



## 2.9 Secções metálicas com aberturas

As secções de aço enformadas a frio com aberturas são frequentemente usadas como elementos estruturais em edifícios residenciais e em sistemas de armazenamento autoportante. Nas habitações, a sua utilização permite a passagem de tubagens; para os sistemas de armazenamento autoportante, permite a ligação entre elementos que constituem o sistema.

A capacidade resistente destas secções é influenciada, não só pelos modos de instabilidade locais, globais e sua interação, mas também pela redução das propriedades transversais devido à existência das aberturas. A grande variedade nos tamanhos e nas configurações das aberturas dificultam a criação de um procedimento para calcular a sua resistência, (Szabo & Dubina, 2004). A EN 1993 não contempla disposições específicas para estas secções, aconselhando uma análise baseada em métodos experimentais e numéricos.

Segundo Szabo e Dubina (2004), a análise das secções com aberturas pode ser efetuada através de uma redução da largura do elemento para uma largura efetiva, e o elemento é tratado como se não existissem furações, ou através de uma redução da espessura da chapa para uma espessura equivalente.

Método da largura efetiva: para a determinação da largura efetiva, a EN 1993-1-3, baseia-se num fator de redução  $\rho$ , que depende da esbelteza da placa  $\bar{\lambda}_p$ . No caso de elementos com furação, a determinação do fator de redução  $\rho_n$  será com base numa esbelteza reduzida  $\bar{\lambda}_{pn}$ . A esbelteza reduzida será dada pelas expressões (2-3) e (2-4), (Szabo & Dubina, 2004),

$$\bar{\lambda}_{pn} = \frac{\bar{\lambda}_p}{\Delta} \quad (2-3)$$

$$\Delta = \sqrt{f\left(\frac{b_{n,p}}{b_p}\right) \times \left(\frac{b_p}{b_{n,p}}\right)} \quad (2-4)$$

onde  $b_p$  é a largura bruta do elemento,  $b_{p,n}$  é a largura do elemento com as furações e  $f\left(\frac{b_{n,p}}{b_p}\right)$  é a função de redução da carga de encurvadura elástica. A função de redução da

carga de encurvadura elástica determinada através de resultados obtidos pelo Método dos Elementos Finitos é definida pela expressão (2-5) , (Szabo & Dubina, 2004).

$$f\left(\frac{b_{n,p}}{b_p}\right) = \frac{P_{cr,n}}{P_{cr}} \quad (2-5)$$

A função de redução depende da relação entre  $b_{p,n}$  e  $b_p$  e se a furação é quadrada ou circular, como se pode verificar na Figura 2-23. A largura efetiva é obtida a partir da expressão (2-6).

$$b_{eff,n} = \rho_n \times b_{p,n} \quad (2-6)$$

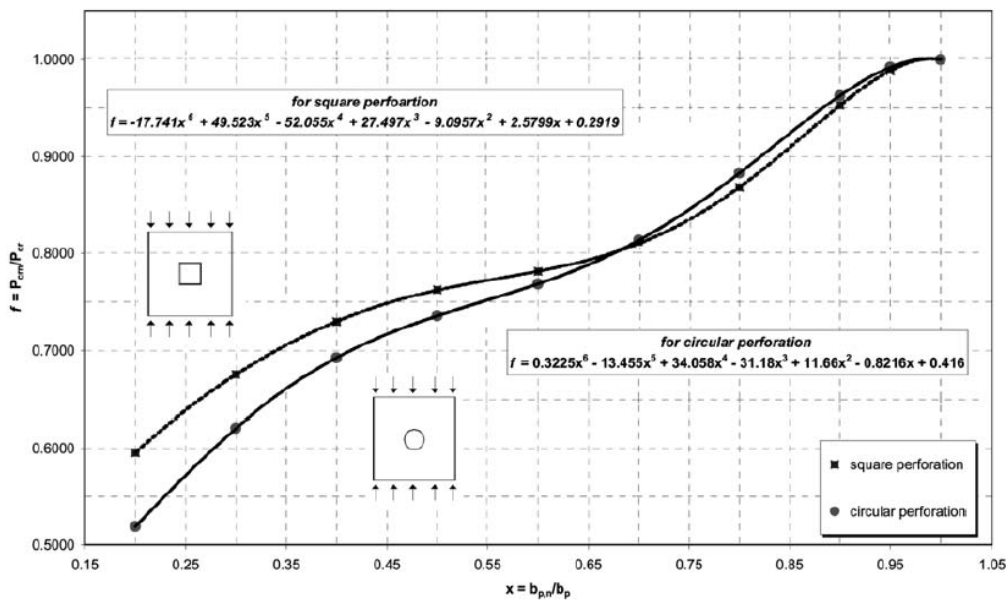


Figura 2-23: Função de redução  $f$ , (Szabo & Dubina, 2004).

Método da espessura equivalente: método simplificado que envolve as áreas do elemento e das furações. O elemento é analisado sem a presença das aberturas, mas com uma espessura equivalente reduzida, que se traduz numa relação entre as áreas do elemento e da furação. A espessura equivalente é dada pela expressão (2-7), (Szabo & Dubina, 2004),

$$t_{eq} = \frac{S - S_p}{S} \times t \quad (2-7)$$

onde  $S$  é a área do elemento,  $S_p$  é a área das furações,  $t_{eq}$  é a espessura equivalente e  $t$  é a espessura da chapa.

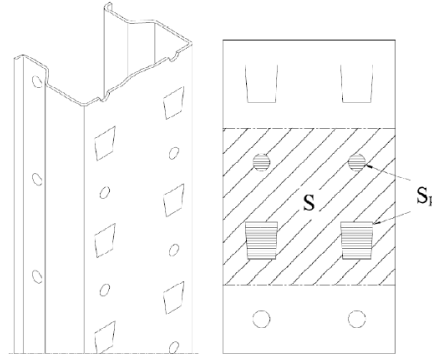


Figura 2-24: Representação das áreas das furações e da área do elemento, (Almeida, 2009).

Em Davies et al. (1997), num estudo realizado em secções perfuradas enformadas a frio do tipo “Rack”, submetidas axialmente e à flexão, o tratamento das perfurações envolve uma “espessura efetiva”. Deste modo as secções com aberturas são tratadas com secções sem aberturas mas com uma espessura equivalente dada pela equação (2-8),

$$t_{eq} = \left[ \frac{L_p}{L} \times \frac{b_n}{b_g} + \left( 1 - \frac{L_p}{L} \right) \times \frac{b_g}{b} \right] \times t \quad (2-8)$$

em que,

$t$  é a espessura da chapa;

$t_{eq}$  é a espessura equivalente da chapa;

$L_p$  é o comprimento total das perfurações;

$L$  é o comprimento da chapa;

$b_n$  é a largura eficaz da chapa dada pela expressão (2-9);

$$b_n = b_g - b \quad (2-9)$$

$b_p$  é a largura total das furações;

$b_g$  é a largura bruta efetiva da chapa dada pela expressão (2-10);

Se  $p_{cr} < 0.123$   $b_g = b$ , caso contrário:

$$b_g = b \times \left[ 1 + 14 \left( \sqrt{\frac{f_{yb}}{P_{cr}}} - 0.35 \right)^4 \right]^{-0.2} \quad (2-10)$$

$b$  é a largura da chapa;

$f_{yb}$  é a tensão de cedência do material;

$K$  é o coeficiente de encurvadura, igual a 4;

$p_{cr}$  é a tensão crítica dada pela expressão (2-11).

$$p_{cr} = 185000 \times K \times \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (2-11)$$

### 3. DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DE CÁLCULO ANALÍTICA

Neste capítulo, pretende-se conhecer as características mecânicas das secções transversais metálicas em estudo e a respetiva capacidade resistente. As secções em estudo dizem respeito a perfis enformados a frio, com secção transversal em C.

Numa primeira abordagem, opta-se por construir uma ferramenta de cálculo com base em expressões analíticas que permitem calcular áreas e inércias efetivas e ainda calcular a capacidade resistente da secção transversal para esforços de compressão simples, esforços de flexão simples segundo o eixo de maior inércia e esforços transversos.

A espessura da chapa utilizada no fabrico dos perfis analisados varia entre 1.2 e 2.5 mm, dependendo da altura da secção transversal. Esta altura varia entre 90 e 300 mm, para larguras de banzo e bordo de reforço constantes, de 40 e 15 mm, respetivamente. Estes perfis têm ainda a particularidade de apresentarem aberturas ovalizadas com bordos reentrantes, localizadas na alma da secção e igualmente espaçadas ao longo da viga metálica. Na Tabela 3-1 apresentam-se as dimensões relevantes das secções transversais analisadas. Todas estas dimensões foram fornecidas em desenhos cotados pela empresa fabricante: Estufas Minho S.A. Os parâmetros definidos na Tabela 3-1 podem ser identificados na Figura 3-7, Figura 3-8 e Figura 3-9. Nestas figuras encontraram-se representadas as variáveis de entrada da ferramenta para a definição das secções transversais.

Tabela 3-1: Dimensões da secção transversal dos perfis em estudo.

Perfil	Altura $h$ (mm)	Largura $b$ (mm)	Bordo de reforço $c$ (mm)	Espessura $t_f$ (mm)	Raio interno $r_i$ (mm)
EMC 90×1.2	90	40	15	1.2	1.8
EMC 90×1.5	90	40	15	1.5	1.5
EMC 120×1.5	120	40	15	1.5	1.5
EMC 150×1.5	150	40	15	1.5	1.5
EMC 200×2.0	200	40	15	2.0	2.0
EMC 200×2.5	200	40	15	2.5	1.5
EMC 250×2.5	250	40	15	2.5	2.5
EMC 300×2.5	300	40	15	2.5	2.5

Os perfis em estudo apresentam dois tipos de furação que se encontra representada na Figura 3-1. A furação correspondente à Figura 3-1 a) tem uma sequência repetitiva ao longo da alma do perfil. Para o caso da Figura 3-1 b) a furação também apresenta uma sequência repetitiva, mas com inversão da sua geometria.

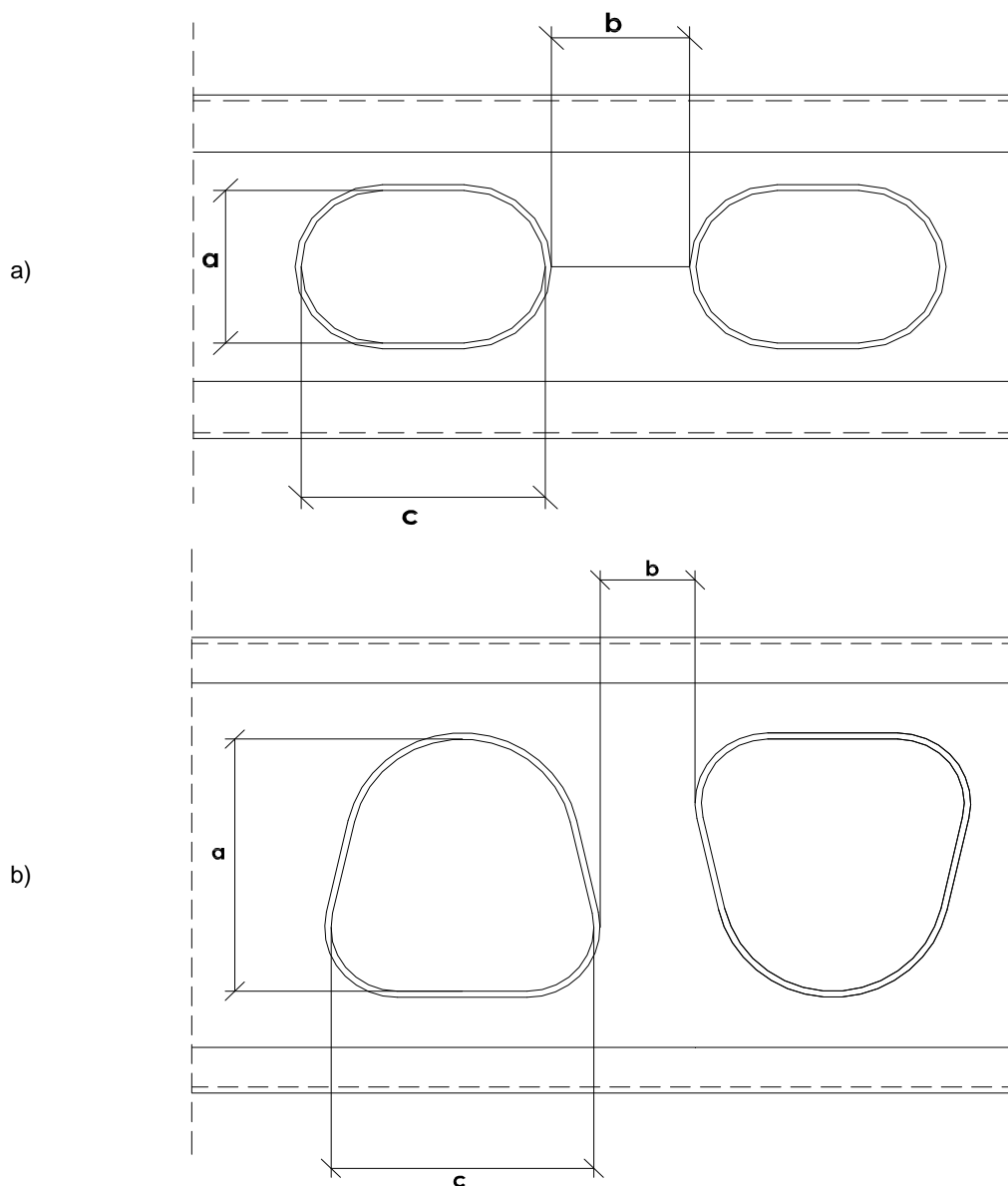


Figura 3-1: Representação esquemática das furações tipo existentes nos perfis em estudo: a) furação correspondente aos perfis de EMC 90×1.2, EMC 90×1.5 e EMC 120×1.5 e b) furação correspondente aos perfis de EMC 150×1.5, EMC 200×2, EMC 200×2.5, EMC 250×2.5 e EMC 300×2.5.

Na Tabela 3-2 apresentam-se as dimensões relativas à furação dos perfis em estudo, de acordo com as variáveis definidas na Figura 3-1. A furação correspondente à Figura 3-1 a) é utilizada nos perfis de EMC 90×1.2, EMC 90×1.5 e EMC 120×1.5. A furação da Figura 3-1 b) é utilizada nos perfis de EMC 150×1.5, EMC 200×2, EMC 200×2.5, EMC 250×2.5 e EMC 300×2.5.

Tabela 3-2: Dimensões das furações correspondentes aos perfis em estudo de acordo com a Figura 3-1.

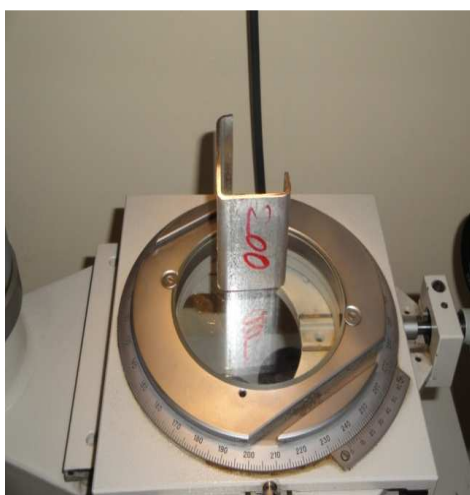
Perfil	$a$ (mm)	$b$ (mm)	$c$ (mm)	Figura
EMC 90×1.2	40	34.6	60	Figura 3-1 a)
EMC 90×1.5	40	34	60	Figura 3-1 a)
EMC 120×1.5	40	41.5	60	Figura 3-1 a)
EMC 150×1.5	83	31	83	Figura 3-1 b)
EMC 200×2.0	83	30	83	Figura 3-1 b)
EMC 200×2.5	83	29	83	Figura 3-1 b)
EMC 250×2.5	132.5	43.35	154.5	Figura 3-1 b)
EMC 300×2.5	132.5	64.75	154.5	Figura 3-1 b)

Ainda no que concerne à geometria dos perfis analisados, surgiram dúvidas sobre os comprimentos dos raios internos definidos pelo parâmetro  $r_i$ . Com vista a clarificar este aspeto foram realizadas medições aos perfis no Laboratório de Metrologia da Universidade do Minho, com recurso a um projetor de perfis PV-350. Este projetor de perfis apresenta uma resolução de 0.1 mm e encontra-se ilustrado na Figura 3-2. Para a realização destas medições foi necessário a utilização de amostras com pequenas dimensões. Estas amostras foram fornecidas pela empresa fabricante, Estufas Minho S.A.

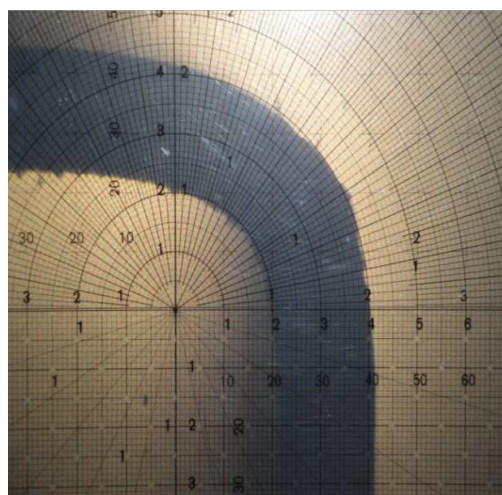
Na Figura 3-3 encontra-se ilustrado um exemplo de medição para o perfil EMC 200×2. De salientar que existiram algumas dificuldades na medição destes raios sobretudo devido à falta de alinhamento dos elementos que constituem a secção transversal (banzo, alma e bordo de reforço), assim como, a existência de pequenas saliências na superfície. Estes aspetos referidos condicionaram a precisão de leitura das medições. Os resultados relativos aos raios internos, definidos pelo parâmetro  $r_i$  resumem-se na Tabela 3-3.



Figura 3-2: Projetor de perfis PV-350 utilizado nas medições dos raios internos dos perfis analisados.



a)



b)

Figura 3-3: Exemplo relativo à medição do perfil EMC 200x2: a) posicionamento do perfil sobre o projetor e b) leitura da medição do raio interno.

Tabela 3-3: Resultados das medições dos raios internos.

Perfil	Raio interno $r_i$ (mm)
EMC 90x1.2	2
EMC 90x1.5	2
EMC 120x1.5	2.5
EMC 150x1.5	2.5
EMC 200x2.0	2
EMC 200x2.5	2
EMC 250x2.5	2.5
EMC 300x2.5	2.5



Os perfis em causa caracterizam-se então pela presença de uma furação uniforme ao longo do seu comprimento e um bordo de reforço. Identificam duas secções para análise: a secção de alma cheia mais afastada das aberturas (Secção a) da Figura 3-4 e a secção com abertura na alma de máxima amplitude e com bordo reentrante ao longo da abertura (Secção b) da Figura 3-4.

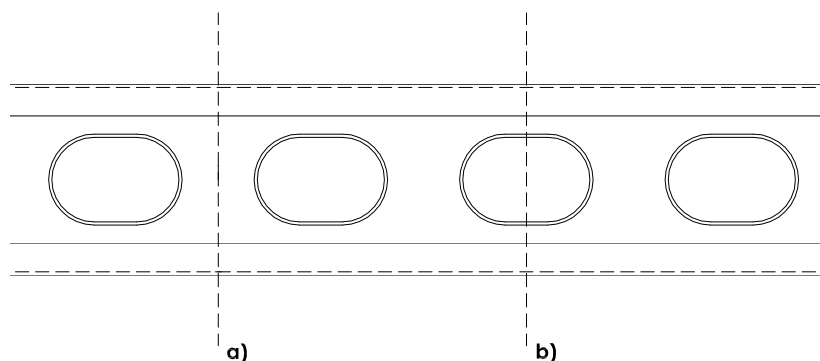


Figura 3-4: Identificação das secções para análise num troço do perfil EMC 90x1.5: a) secção de alma cheia e b) secção com abertura na alma de máxima amplitude.

Na ferramenta desenvolvida são consideradas três situações tipo:

- ✓ Secção sem abertura;
- ✓ Secção com abertura;
- ✓ Secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura.

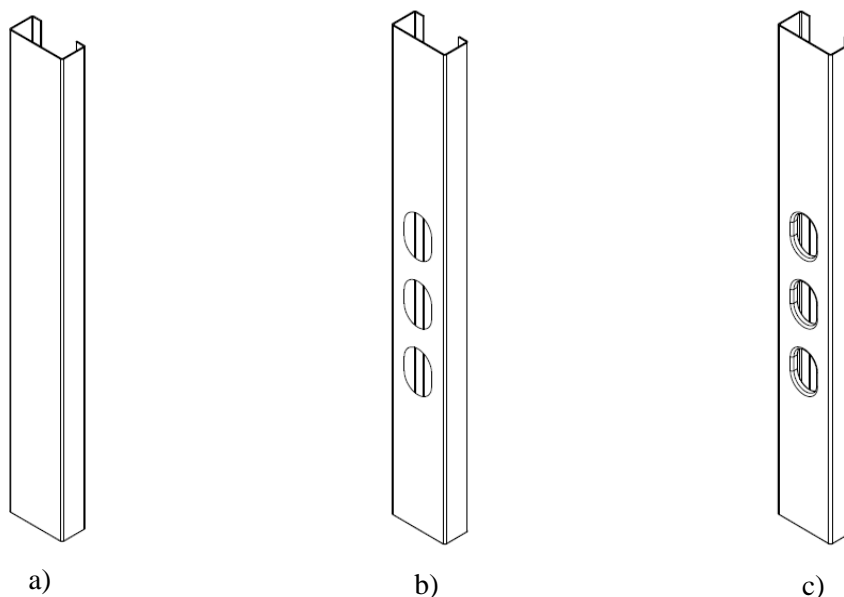


Figura 3-5: Troços do perfil EMC 90x1.5: a) perfil sem aberturas, b) perfil com aberturas e c) perfil com aberturas e bordo reentrante ao longo das aberturas.

O perfil com aberturas e sem bordo reentrante ao longo das aberturas – caso 2 da Figura 3-5 - não faz parte do conjunto de perfis em estudo. No entanto, a sua inclusão é necessária para se perceber qual a influência do bordo reentrante ao longo da abertura posicionada na alma na capacidade resistente da secção quando solicitada aos vários tipos de esforços.

### 3.1 Estrutura da ferramenta

De modo a permitir realizar o estudo de uma forma sistemática, é construída uma ferramenta de cálculo baseada em Microsoft Excel, que permite fazer a análise e quantificação das características mecânicas das secções transversais, em função de parâmetros de entrada que consistem basicamente nas dimensões da secção transversal e nas características do material utilizado. A ferramenta analisa secções submetidas a esforços de compressão simples, esforços de flexão simples segundo o eixo de maior inércia e esforços transversos.

Na Tabela 3-4 identificam-se os casos que a ferramenta de cálculo está preparada para analisar. Esta ferramenta permite determinar as propriedades brutas para três configurações de secção transversal: secção sem abertura, com abertura e com abertura de bordo reentrante ao longo da abertura. Permite também determinar a capacidade resistente para as três configurações de secção transversal quando submetida a esforços de compressão e flexão segundo o eixo de maior inércia, e quantifica ainda a resistência ao esforço transversal para a configuração da secção transversal sem abertura. É de salientar que a ferramenta foi desenvolvida para determinar a resistência de secções transversais e não de barras. Desta forma têm-se em conta os fenómenos de instabilidade local de placa e distorcional. Os fenómenos de instabilidade global não são tidos em conta porque estão associados à resistência de barras.

Tabela 3-4: Possíveis combinações que a ferramenta prevê.

Solicitação	Secção sem abertura	Secção com abertura	Secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura
Compressão	×	×	×
Flexão segundo o eixo de maior inércia	×	×	×
Transverso	×	-	-

Para atender às três configurações de secção transversal e aos tipos de solicitação já referidos, foram criadas folhas de cálculo diferentes para cada tipo de secção e solicitação. Assim, foram definidas as seguintes folhas de cálculo:

- ✓ Compressão - secção sem abertura;
- ✓ Compressão - secção com abertura;
- ✓ Compressão - secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura;
- ✓ Flexão em torno do eixo de maior inércia - secção sem abertura;
- ✓ Flexão em torno do eixo de maior inércia - secção com abertura;
- ✓ Flexão em torno do eixo de maior inércia - secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura;
- ✓ Esforço transversal - secção sem abertura.

A divisão da ferramenta Excel em diferentes folhas deve-se ao facto de os parâmetros de entrada serem diferentes entre configurações de secção transversal e ao facto do tipo de solicitação influenciar a quantificação das propriedades efetivas e consequentemente a sua capacidade resistente.

A ferramenta encontra-se então dividida em folhas de cálculo, e cada folha quantifica as propriedades brutas, as propriedades efetivas e a capacidade resistente da secção, dependendo do tipo de solicitação.

Nesta ferramenta não é implementada uma classificação dos elementos da secção de acordo com a cláusula 5.5.2 da EN 1993-1-1, isto porque, para cada elemento constituinte (banzo, alma e bordo de reforço), se procede à quantificação do coeficiente de redução  $\rho$  que se encontra definido na cláusula 4.4 (2) da prEN 1993-1-5.

Na quantificação das propriedades da secção transversal, considera-se uma redução da resistência da secção devido à encurvadura local de placa, o que é traduzido através da redução da dimensão de cada um dos elementos da secção transversal (secção efetiva). A ferramenta quantifica a redução da secção por elemento, nomeadamente: redução na alma, no banzo e no bordo de reforço. De salientar que a ordem para determinação das propriedades efetivas dos elementos (alma, banzo e bordo de reforço) depende do tipo de solicitação. Para o caso de uma secção submetida à compressão não é necessário seguir

uma sequência pré-estabelecida para a determinação das propriedades efetivas dos elementos, porque não existe mudança de centro de gravidade, e o coeficiente que relaciona as tensões toma o valor unitário ( $\psi=1$ ). Já para o caso de uma secção submetida à flexão, é necessário respeitar uma sequência na determinação das propriedades efetivas, uma vez que, existe mudança na posição do centro de gravidade ( $\psi<0$ ). A sequência utilizada é:

- ✓ Determinação da largura efetiva do banzo;
- ✓ Determinação da largura efetiva do bordo de reforço;
- ✓ Determinação da largura efetiva da alma.

Devido à existência de bordo de reforço, é necessário atender à encurvadura por distorção, tal como a EN 1993-1-3 sugere. Na ferramenta, é implementada uma metodologia que considera a redução da resistência da secção através da redução da espessura de reforço.

De salientar que na quantificação da secção efetiva, nomeadamente na zona de bordo de reforço, se implementa um processo iterativo que tem como objetivo a majoração das larguras efetivas do bordo de reforço e da sua espessura. Este processo iterativo, tal como a cláusula 5.5.3.3 (3) da EN 1993-1-3 indica, é opcional. O critério de paragem diz respeito à igualdade de coeficientes de redução entre diferentes iterações da espessura do bordo de reforço.

### 3.2 Propriedades do material

Na Tabela 3-5 definem-se os parâmetros de entrada referentes às propriedades do material. De acordo com esta tabela pode-se constatar que a ferramenta possibilita a análise de vários tipos de aço com revestimento.

Tabela 3-5: Parâmetros de entrada referentes às propriedades do material.

Propriedades do material							
Tipo de Aço	Módulo de elasticidade $E$ (MPa)	Tensão de cedência $f_y$ (MPa)	Tensão última $f_u$ (MPa)	Coeficiente de poisson $\nu$	Espessura de revestimento em zinco $Z\ 275$ (mm) $t_{zinco}$	Coeficiente parcial de segurança $\gamma_{m0}$	Coeficiente parcial de segurança $\gamma_{m1}$

E (GPa)	210
Tipo de aço	S280
$f_y$ (MPa)	280
$f_u$ (MPa)	360
$\gamma_{M0}$	1
$\gamma_{M1}$	1
G (MPa)	80769
$\nu$	0,3
$\varepsilon$	0,916

Figura 3-6: Excerto de uma folha de cálculo com as variáveis de entrada referentes às propriedades do material.

Para o presente estudo as características referentes às propriedades do material são as indicadas na Tabela 3-6.

Tabela 3-6: Propriedades do material utilizado no presente estudo.

Propriedades do material							
Tipo de Aço	Módulo de elasticidade $E$ (GPa)	Tensão de cedência $f_y$ (MPa)	Tensão última $f_u$ (MPa)	Coeficiente de poisson $\nu$	Espessura de revestimento em zinco Z 275 (mm) $t_{\text{zinco}}$	Coeficiente parcial de segurança $\gamma_{M0}$	Coeficiente parcial de segurança $\gamma_{M1}$
S280	210	280	360	0.3	0.04	1	1

O tipo de aço utilizado é igual em todos os perfis estudados assim com a espessura de revestimento em zinco. O valor da espessura de revestimento em zinco refere-se a um Z 275, que tal como a EN 1993-1-3 indica é de 0.04 mm. Quanto aos coeficientes parciais de segurança, estes podem variar em cada país de acordo com o respetivo Documento Nacional de Aplicação. A EN 1993-1-3 sugere valores unitários para o  $\gamma_{M0}$  e  $\gamma_{M1}$ .

### 3.3 Propriedades brutas da secção

Para a quantificação das propriedades brutas da secção transversal distinguem-se então três casos: secção sem abertura, secção com abertura e secção com abertura e bordo reentrante ao logo da abertura. Para os três casos, os parâmetros de entrada referentes às propriedades da secção são diferentes devido às particularidades da geometria de cada secção transversal tipo.

Na Figura 3-7, Figura 3-8 e Figura 3-9 encontram-se representadas as variáveis de entrada das secções transversais em estudo. Estas variáveis foram implementadas na ferramenta para quantificar não só as propriedades brutas da secção mas também as propriedades efetivas.

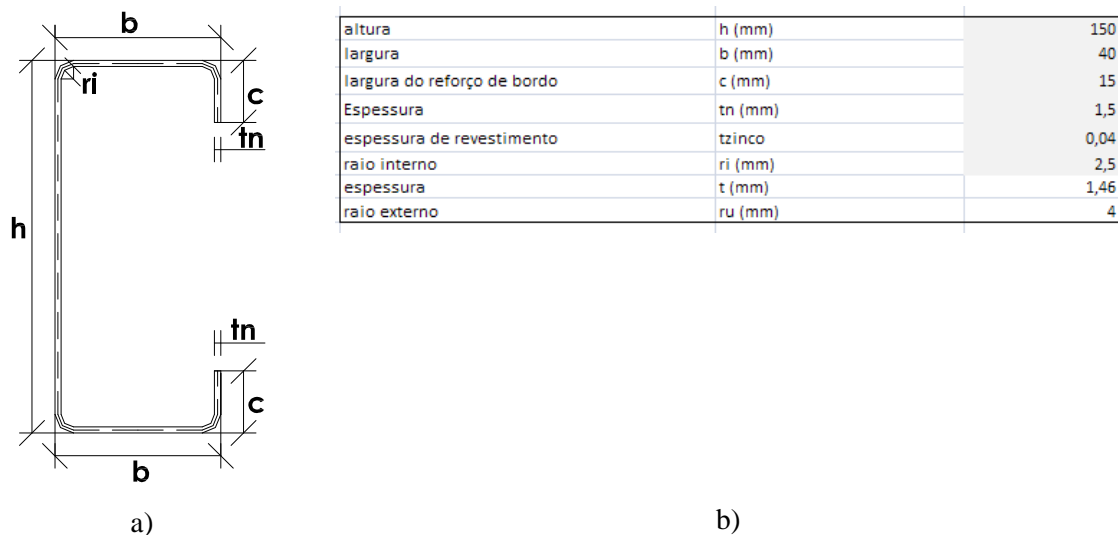


Figura 3-7: Parâmetros de entrada referentes à secção transversal: a) secção sem abertura e b) excerto da folha de cálculo com os parâmetros de entrada.

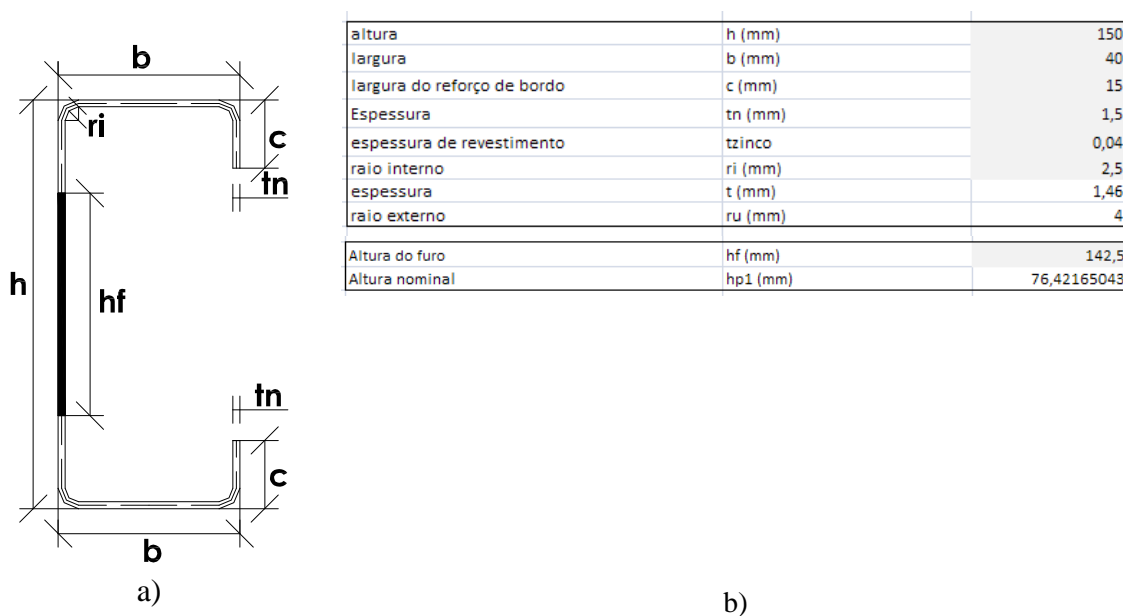


Figura 3-8: Parâmetros de entrada referentes à secção transversal: a) secção com abertura e b) excerto da folha de cálculo com os parâmetros de entrada.

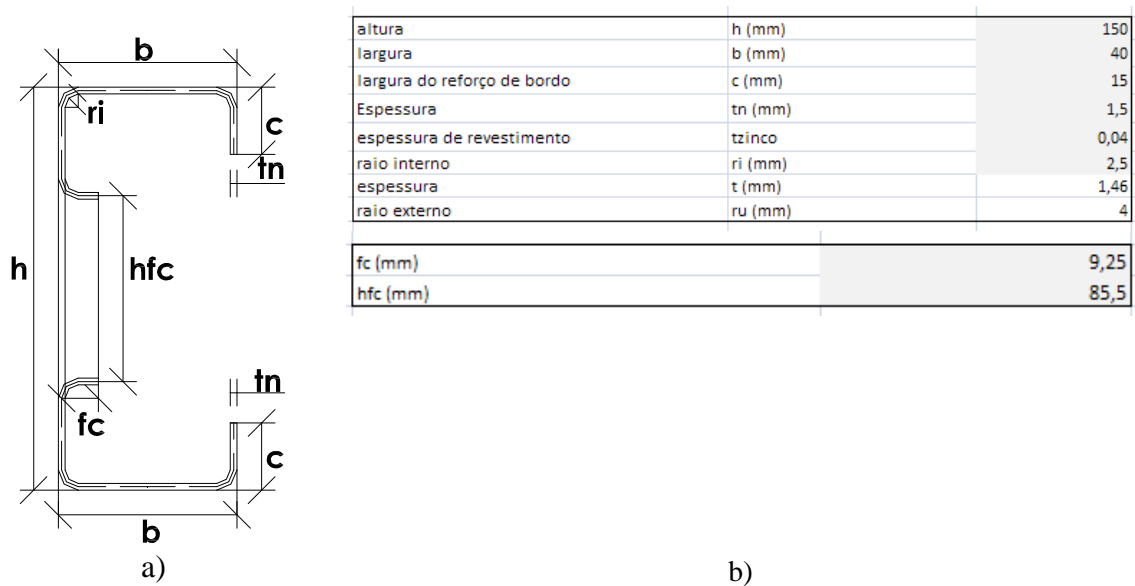


Figura 3-9: Parâmetros de entrada referentes à secção transversal: a) secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura e b) excerto da folha de cálculo com os parâmetros de entrada.

A secção bruta contabiliza toda a área da secção transversal, não tendo em conta os efeitos da instabilidade local de placa e distorcional.

A EN 1993-1-3 considera duas abordagens para a determinação das características da secção transversal com a existência de “dobras” ou “cantos arredondados”: a secção bruta idealizada e a secção bruta nominal.

A influência dos “cantos arredondados” na resistência da secção transversal pode ser negligenciada caso se verifique as condições (3-1) e (3-2), relativas ao raio interno. Nesta situação considera-se a análise segundo a linha média, secção bruta idealizada.

$$r \leq 5t \quad (3-1)$$

$$r \leq 0.1 \times b_p \quad (b_p \text{ dado na Figura 3-10}) \quad (3-2)$$

Para a secção bruta idealizada as propriedades da secção devem ainda ser corrigidas por um fator  $\delta$  determinado pela equação (3-3),

$$\delta = 0.43 \times \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\phi_j}{90^\circ}}{\sum_{i=1}^m b_{p,i}} \quad (3-3)$$

onde,

$n$  é o número de elementos curvos;

$m$  é o número de elementos planos;

$r_j$  é o raio interno do elemento curvo  $j$ ;

$\Phi$  é o ângulo entre dois elementos planos;

$b_{p,i}$  é a largura do elemento plano  $i$  para uma secção idealizada.

Na secção bruta nominal, o cálculo das propriedades é efetuado com base na geometria nominal da secção (ver Figura 3-10 e Figura 3-11). Neste caso, as propriedades da secção não estão sujeitas a qualquer fator de correção.

No cálculo das propriedades geométricas, a ferramenta foi implementada tendo em conta a secção bruta nominal, tal como, a cláusula 5.1.(2) da EN 1993-1-3 sugere. Deste modo tem-se em conta a existência de cantos “arredondados”. A influência dos cantos arredondados é traduzida na Figura 3-10 e nas equações (3-4) e (3-5), onde os comprimentos nominais são calculados tendo em conta as zonas curvas da secção,

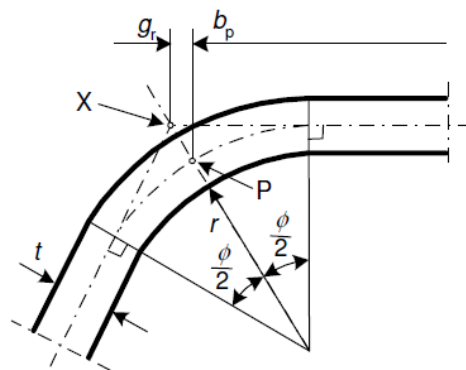


Figura 3-10: Ponto intermédio do canto (EN 1993-1-3, 2006).

onde,

$X$  é a intersecção das linhas intermédias;

$P$  é o ponto intermédio do canto;

$t$  é a espessura da secção;

$r_m$  é o raio da linha média;

$\Phi$  é o ângulo entre dois elementos planos.



$$r_m = r + t/2 \quad (3-4)$$

$$g_r = r_m \left( \tan \frac{\phi}{2} - \sin \frac{\phi}{2} \right) \quad (3-5)$$

$$t = t_n - t_{zinco} \quad (3-6)$$

Para os três casos de secção transversal considerados, definem-se parâmetros para atender aos cantos arredondados, que são traduzidos pelas equações (3-7) e (3-8). A equação (3-7) diz respeito ao comprimento do canto arredondado e a equação (3-8) ao centro de gravidade do canto arredondado. O ângulo entre elementos planos é de 90° para todos os perfis em estudo. É de salientar que estes parâmetros são implementados na ferramenta não só para a quantificação das propriedades brutas, mas também para a determinação das propriedades efetivas.

$$u = \frac{2\pi}{4} \times r_m \quad (3-7)$$

$$w = 0.363 \times r_m \quad (3-8)$$

As larguras nominais introduzidas na ferramenta são dadas pelas expressões (3-9) a (3-15). Mais uma vez se destaca que estas larguras são utilizadas na obtenção das propriedades brutas e efetivas. A largura nominal  $h_{p1}$ , traduzida pela equação (3-14), é apenas utilizada na secção com abertura, enquanto a equação (3-15) é utilizada na secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura.

$$h_p = h_c - 2 \times g_r \quad (3-9)$$

$$b_p = b_c - 2 \times g_r \quad (3-10)$$

$$c_p = c_c - g_r \quad (3-11)$$

$$f_p = f_c - g_r \quad (3-12)$$

$$h_{fp} = h_{fc} + 2 \times g_r \quad (3-13)$$

$$h_{p1} = \frac{h_p - h_f}{2} \quad (3-14)$$

$$h_{p1} = \frac{h_p - h_{fp}}{2} \quad (3-15)$$

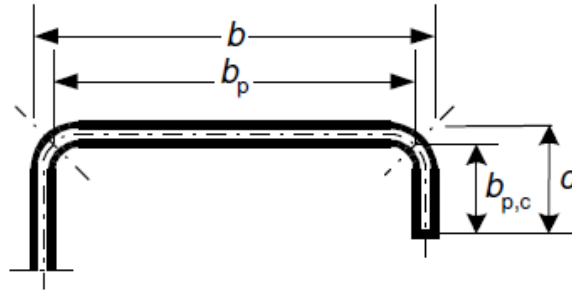


Figura 3-11: Exemplo para a ilustração das larguras nominais (EN 1993-1-3, 2006).

As dimensões, medidas segundo o eixo das secções transversais são dadas pelas equações (3-16) a (3-19):

$$h_c = h - t \quad (3-16)$$

$$b_c = b - t \quad (3-17)$$

$$c_c = c - \frac{t}{2} \quad (3-18)$$

$$h_{p1c} = \frac{h_c - h_{fc}}{2} \quad (3-19)$$

A largura definida pelo parâmetro  $h_{p1c}$  referente à equação (3-19) é apenas utilizada para a secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura.

Para o dimensionamento e verificação de segurança de elementos estruturais com base na EN 1993-1-3 é necessário que se verifiquem as condições dadas de (3-20) a (3-23). Esses limites estão relacionados com as esbeltezas máximas da secção.

$$\frac{h}{t_n} \leq 500 \sin \varnothing \quad (3-20)$$

$$\frac{b}{t_n} \leq 60 \quad (3-21)$$

$$\frac{c}{t_n} \leq 50 \quad (3-22)$$

$$0.2 \leq \frac{c}{b} \leq 0.6 \quad (3-23)$$

Se todas as condições anteriores forem válidas, é possível utilizar a metodologia proposta na EN 1993-1-3. Em caso contrário, a ferramenta alerta para o facto de não ser possível utilizar a metodologia.

As características brutas que a ferramenta expõe são apresentadas na Tabela 3-7, Tabela 3-8 e Tabela 3-9:

- ✓ Centro gravidade em relação aos eixos yy e zz;
- ✓ Inércias da secção em relação aos eixos principais,  $y_G$  e  $z_G$ ;
- ✓ Área bruta da secção.

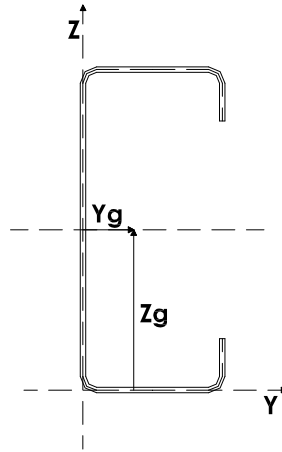


Figura 3-12: Eixos de referência para a definição do centro de gravidade.

Tabela 3-7: Características mecânicas da secção transversal bruta – secção sem abertura.

Área bruta	$A_g = t \times (h_p + 2 \times b_p + 2 \times c_p + 4 \times u)$	(3-24)
Centro de gravidade em relação a zz	$z_g = \frac{h_c}{2}$	(3-25)
Centro de gravidade em relação a yy	$y_g = \frac{1}{A_g} \times \left( 2 \times b_p \times t \times \left( g_r + \frac{b_p}{2} \right) + 2 \times u \times t \times w + 2 \times u \times t \times (b_c - w) + 2 \times c_p \times t \times b_c \right)$	(3-26)
Inércia em torno do eixo $y_G$	$I_{yg} = \frac{h_p^3 \times t}{12} + 2 \times \left( \frac{b_p \times t^3}{12} + b_p \times t \times \left( \frac{h_c}{2} \right)^2 \right) + 2 \times \left( \frac{c_p^3 \times t}{12} + c_p \times t \times \left( \frac{h_c}{2} - c_c + \frac{c_p}{2} \right)^2 \right) + 4 \times u \times t \times \left( \frac{h_c}{2} - w \right)^2$	(3-27)
Inércia em torno do eixo $z_G$	$I_{zg} = \frac{h_p \times t^3}{12} + h_p \times t \times y_g^2 + 2 \times \left( \frac{b_p^3 \times t}{12} + b_p \times t \times \left( g_r + \frac{b_p}{2} - y_g \right)^2 \right) + 2 \times u \times t \times (w - y_g)^2 + 2 \times u \times t \times (b_c - w - y_g)^2 + 2 \times \left( \frac{c_p \times t^3}{12} + c_p \times t \times (b_c - y_g)^2 \right)$	(3-28)
Módulo de flexão em relação a $y_G$	$w_{el} = \frac{I_{yg}}{z_g}$	(3-29)

Tabela 3-8: Características mecânicas da secção transversal bruta – secção com abertura.

Área bruta	$A_g = t \times (h_p + 2 \times b_p + 2 \times c_p + 4 \times u - h_f)$	(3-30)
Centro de gravidade em relação a zz	$z_g = \frac{h_c}{2}$	(3-31)
Centro de gravidade em relação a yy	$y_g = \frac{1}{A_g} \times \left( 2 \times b_p \times t \times \left( g_r + \frac{b_p}{2} \right) + 2 \times u \times t \times w + 2 \times u \times t \times (b_c - w) + 2 \times c_p \times t \times b_c \right)$	(3-32)
Inércia em torno do eixo $y_G$	$I_{yg} = \frac{h_p^3 \times t}{12} + 2 \times \left( \frac{b_p \times t^3}{12} + b_p \times t \times \left( \frac{h_c}{2} \right)^2 \right) + 2 \times \left( \frac{c_p^3 \times t}{12} + c_p \times t \times \left( \frac{h_c}{2} - c_c + \frac{c_p}{2} \right)^2 \right) + 4 \times u \times t \times \left( \frac{h_c}{2} - w \right)^2 - \frac{h_f^3 \times t}{12}$	(3-33)
Inércia em torno do eixo $z_G$	$I_{zg} = \frac{h_p \times t^3}{12} + h_p \times t \times y_g^2 + 2 \times \left( \frac{b_p^3 \times t}{12} + b_p \times t \times \left( g_r + \frac{b_p}{2} - y_g \right)^2 \right) + 2 \times u \times t \times (w - y_g)^2 + 2 \times u \times t \times (b_c - w - y_g)^2 + 2 \times \left( \frac{c_p \times t^3}{12} + c_p \times t \times (b_c - y_g)^2 \right) - \left( \frac{h_f \times t^3}{12} + h_f \times t \times y_g^2 \right)$	(3-34)
Módulo de flexão em relação a $y_G$	$w_{el} = \frac{I_{yg}}{z_g}$	(3-35)

Tabela 3-9: Características mecânicas da secção transversal bruta – secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura.

Área bruta	$A_g = t \times (2 \times h_{p1} + 2 \times b_p + 2 \times c_p + 6 \times u + 2 \times f_p)$	(3-36)
Centro de gravidade em relação a $z_z$	$z_g = \frac{h_c}{2}$	(3-37)
Centro de gravidade em relação a $y_y$	$y_g = \frac{1}{A_g} \times \left( 2 \times b_p \times t \times \left( g_r + \frac{b_p}{2} \right) + 2 \times u \times t \times w + 2 \times u \times t \times (b_c - w) + 2 \times c_p \times t \times b_c + 2 \times f_p \times t \times \left( g_r + \frac{f_p}{2} \right) + 2 \times u \times t \times w \right)$	(3-38)
Inércia em torno do eixo $y_g$	$I_{yg} = 2 \times \left( \frac{b_p \times t^3}{12} + b_p \times t \times \left( \frac{h_c}{2} \right)^2 \right) + 2 \times \left( \frac{c_p^3 \times t}{12} + c_p \times t \times \left( \frac{h_c}{2} - c_c + \frac{c_p}{2} \right)^2 \right) + 2 \times \left( \frac{h_{p1}^3 \times t}{12} + h_{p1} \times t \times \left( \frac{h_c}{2} - h_{p1c} + g_r + \frac{h_{p1}}{2} \right)^2 \right) + 4 \times u \times t \times \left( \frac{h_c}{2} - w \right)^2 + 2 \times u \times t \times \left( \frac{h_{fc}}{2} + w \right)^2 + 2 \times \left( \frac{f_p \times t^3}{12} + f_p \times t \times \left( \frac{h_{fc}}{2} \right)^2 \right)$	(3-39)
Inércia em torno do eixo $z_g$	$I_{zg} = 2 \times \left( \frac{h_{p1} \times t^3}{12} + h_{p1} \times t \times y_g^2 \right) + 2 \times u \times t \times (w - y_g)^2 + 2 \times \left( \frac{f_p^3 \times t}{12} + f_p \times t \times \left( g_r + \frac{f_p}{2} - y_g \right)^2 \right) + 2 \times \left( \frac{b_p^3 \times t}{12} + b_p \times t \times \left( g_r + \frac{b_p}{2} - y_g \right)^2 \right) + 2 \times u \times t \times (w - y_g)^2 + 2 \times u \times t \times (b_c - w - y_g)^2 + 2 \times \left( \frac{c_p \times t^3}{12} + c_p \times t \times (b_c - y_g)^2 \right)$	(3-40)
Módulo de flexão em relação a $y_g$	$w_{el} = \frac{I_{yg}}{z_g}$	(3-41)

### 3.4 Propriedades efetivas – secções submetidas à compressão

De seguida expõem-se os principais aspetos relacionados com a determinação da secção efetiva para as diferentes secções transversais em estudo e as decisões que foram tomadas na análise da secção transversal efetiva. As metodologias referentes à quantificação das propriedades efetivas de acordo com a EN 1993-1-3, encontram-se expostas no Anexo A, na qual se expõem metodologias para o cálculo das larguras efetivas de modo a atender a encurvadura local de placa e metodologias para o cálculo da espessura reduzida da zona de

reforço, por forma a atender à encurvadura distorcional. Na apresentação faz-se uma divisão de acordo com a secção transversal. Como já se referiu, foram criadas diferentes folhas de cálculo para atender a cada tipo de secção transversal e a cada esforço aplicado.

Secção sem abertura e secção com abertura:

Na quantificação da secção transversal efetiva, adotam-se os mesmos procedimentos utilizados na determinação das larguras efetivas do banzo e do bordo de reforço na secção sem abertura e na secção com abertura.

Na determinação da altura efetiva da alma para a secção sem abertura, considera-se que esta é um elemento interno. No caso da secção com abertura considera-se que cada elemento é um elemento externo. Como consequência, a principal diferença está no fator de redução. Além disso, a altura efetiva está sempre condicionada pela presença dessa abertura, no caso da secção com abertura.

Na quantificação da redução da espessura de reforço para atender aos fenómenos de encurvadura distorcional, a metodologia implementada é mais uma vez igual para as secções com e sem abertura.

Por último e de igual modo para as duas situações a ferramenta quantifica a área efetiva da secção e o correspondente esforço axial resistente.

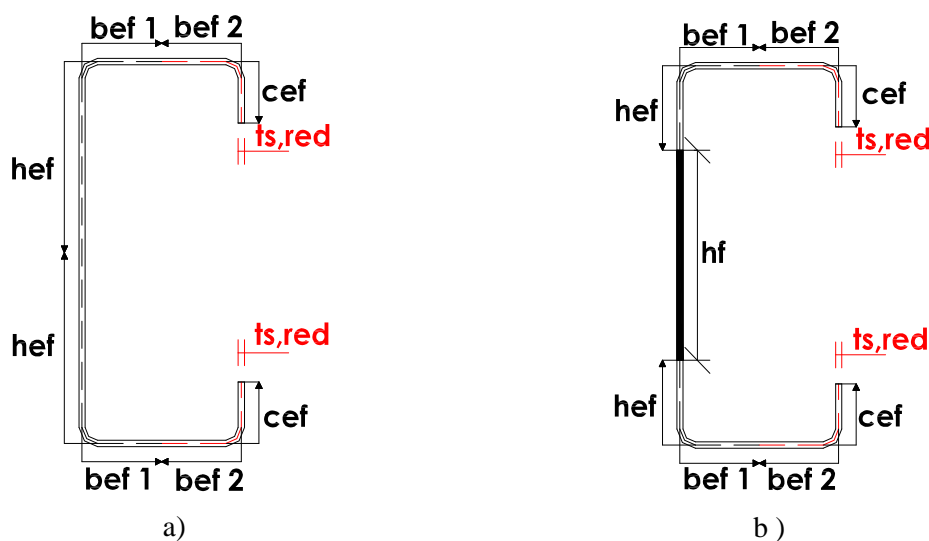


Figura 3-13: Variáveis utilizadas na ferramenta para a definição da secção efetiva: a) secção sem abertura, submetida à compressão e b) secção com abertura, submetida à compressão.

Tabela 3-10: Expressões analíticas referentes às variáveis utilizadas na ferramenta para a definição da secção efetiva com e sem abertura.

Variáveis	Secção sem abertura	Secção com abertura
$b_{ef1}$	$b_{ef1} = 0.5 \times \rho \times b_p + g_r$ (3-42)	$b_{ef1} = 0.5 \times \rho \times b_p + g_r$ (3-43)
$b_{ef2}$	$b_{ef2} = 0.5 \times \rho \times b_p + g_r$ (3-44)	$b_{ef2} = 0.5 \times \rho \times b_p + g_r$ (3-45)
$h_{ef}$	$h_{ef} = 0.5 \times \rho \times h_p + g_r$ (3-46)	$h_{ef} = \rho \times h_{p1} + g_r$ (3-47)
$c_{ef}$	$c_{ef} = \rho \times c_p + g_r$ (3-48)	$c_{ef} = \rho \times c_p + g_r$ (3-49)

Na Tabela 3-10 o parâmetro  $\rho$  refere-se ao coeficiente de redução, que se encontra definido na cláusula 4.4 (2) da EN 1993-1-5.

Tabela 3-11: Características efetivas e capacidade resistente da secção transversal – secção sem/ com abertura.

Área efetiva	$A_{eff} = 2 \times (h_{ef} - g_r) \times t + 2 \times (b_{ef1} - g_r) \times t + 2 \times u \times t + 2 \times (b_{ef2} - g_r) \times t_{s,red} + 2 \times (c_{ef} - g_r) \times t_{s,red} + 2 \times u \times t_{s,red}$ (3-50)
Esforço axial resistente	$N_{c,rd} = \frac{f_y \times A_{eff}}{\gamma_{m0}}$ (3-51)

#### Secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura:

Na quantificação da secção efetiva, o bordo reentrante ao longo da abertura é tratado de igual forma que o bordo de reforço, assim como, a quantificação da redução da sua espessura para atender à instabilidade distorcional. Para a implementação do processo iterativo na ferramenta são consideradas duas possibilidades: quantificação das larguras efetivas e da espessura para a zona do bordo de reforço e para a zona de bordo reentrante ao longo da abertura.

Na quantificação da altura efetiva da alma considerou-se que cada elemento é um elemento interno, pelo facto de estes elementos estarem entre um bordo reentrante ao longo da abertura e o banzo.

Devido à existência de um bordo reentrante ao longo da abertura, foram implementadas três situações possíveis de secção transversal efetiva. Deste modo a ferramenta expõe três soluções possíveis, sendo a mais adequada aquela em que o processo iterativo corre para as diferentes partes (bordo de reforço e bordo reentrante ao longo da abertura). Volta-se a

destacar que o processo iterativo segundo a cláusula 5.5.3.3 (3) da EN 1993-1-3 indica é opcional, e a sua exclusão simplifica bastante a obtenção de resultados. No entanto, opta-se por implementar o processo iterativo na ferramenta devido aos ganhos obtidos na capacidade resistente da secção transversal. As três secções possíveis de secção transversal efetiva são as seguintes:

- ✓ Secção efetiva com processo iterativo para as zonas de bordo de reforço e para a o bordo reentrante ao longo da abertura;
- ✓ Secção efetiva com processo iterativo para o bordo de reforço;
- ✓ Secção efetiva com processo iterativo para o bordo reentrante ao longo da abertura.

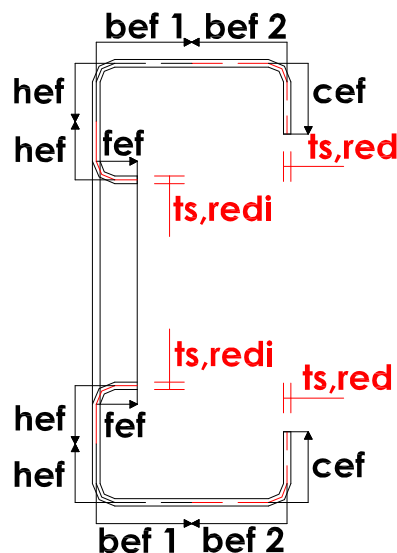


Figura 3-14: Variáveis utilizadas na ferramenta para a definição da secção efetiva na secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, submetida à compressão.

Tabela 3-12: Expressões analíticas referentes às variáveis utilizadas na ferramenta para a definição da secção efetiva com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura.

Variáveis	Secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura	
$b_{ef1}$	$b_{ef1} = 0.5 \times \rho \times b_p + g_r$	(3-52)
$b_{ef2}$	$b_{ef2} = 0.5 \times \rho \times b_p + g_r$	(3-53)
$h_{ef}$	$h_{ef} = 0.5 \times \rho \times h_{p1} + g_r$	(3-54)
$c_{ef}$	$c_{ef} = \rho \times c_p + g_r$	(3-55)
$f_{ef}$	$f_{ef} = \rho \times f_p + g_r$	(3-56)



Tabela 3-13: Características efetivas e capacidade resistente da secção transversal – secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura.

Área efetiva	$A_{eff} = 2 \times (h_{ef} - g_r) \times t + 2 \times (b_{ef1} - g_r) \times t + 2 \times u \times t + 2 \times (b_{ef2} - g_r) \times t_{s,red} + 2 \times (c_{ef} - g_r) \times t_{s,red} + 2 \times u \times t_{s,red} + 2 \times (h_{ef} - g_r) \times t_{s,redi} + 2 \times (f_{ef} - g_r) \times t_{s,redi} + 2 \times u \times t_{s,redi}$	(3-57)
Esforço axial resistente	$N_{c,rd} = \frac{f_y \times A_{eff}}{\gamma_{m0}}$	(3-58)

### 3.5 Propriedades efetivas – secções submetidas à flexão segundo o eixo de maior inércia

No caso das secções submetidas à flexão segundo o eixo de maior inércia, volta-se a fazer uma apresentação de acordo com a secção transversal a analisar. De seguida, expõe-se a forma de abordar a secção transversal efetiva, assim como, as limitações e a validade das opções de cálculo adotadas. No Anexo A, encontram-se as metodologias propostas na EN 1993-1-3 para a quantificação das propriedades efetivas da secção transversal.

#### Secção sem abertura e secção com abertura:

A metodologia adotada para a determinação da largura efetiva do banzo e da largura efetiva e espessura do bordo de reforço superior é idêntica à adotada para a compressão, para o caso de uma flexão positiva (trações na zona inferior e compressões na zona superior).

Para a quantificação da altura efetiva da alma da secção sem abertura, e devido à mudança do centro de gravidade, é necessário quantificar o parâmetro,  $\psi$ , dado pela equação (3-59) que relaciona as tensões máximas de tração e compressão. A ferramenta é válida apenas para o caso deste parâmetro ser negativo ( $\psi < 0$ ). Este parâmetro é útil para a obtenção do coeficiente de esbelteza e do coeficiente de redução.

Na quantificação da altura efetiva dos elementos da alma que compõem a secção transversal com abertura, considera-se cada elemento como elemento externo. A ferramenta só é válida quando se cumpre a condição (3-60), ou seja, quando parte da secção, acima ou abaixo da abertura, está totalmente tracionada ou comprimida. Na

determinação do fator de encurvadura,  $k_\sigma$ , dado na Tabela A1-2 do Anexo A, considera-se o valor unitário para parâmetro que relaciona as tensões máximas de tração e de compressão,  $\psi$ , desta forma, garantem-se as condições de segurança.

$Z_{nr}$  corresponde à mudança de centro de gravidade (Figura 3-15).

$$\psi = -\left(\frac{h_c}{2} + z_{nr}\right) \times \left(\frac{h_c}{2} - z_{nr}\right)^{-1} \quad (3-59)$$

$$|z_{nr}| < \left|\frac{h_f}{2}\right| \quad (3-60)$$

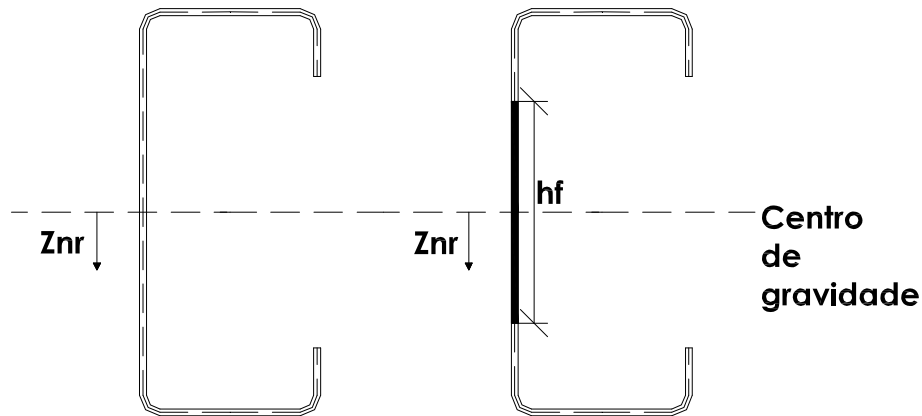


Figura 3-15: Representação esquemática do parâmetro  $Z_{nr}$ , referente à mudança de centro de gravidade, para o caso de uma flexão positiva, em secções com e sem abertura.

Por último, e de igual modo para ambas as secções com e sem abertura, a ferramenta quantifica as seguintes grandezas: área efetiva, inércia efetiva em torno do eixo de maior inércia, módulo de flexão mínimo e momento resistente.

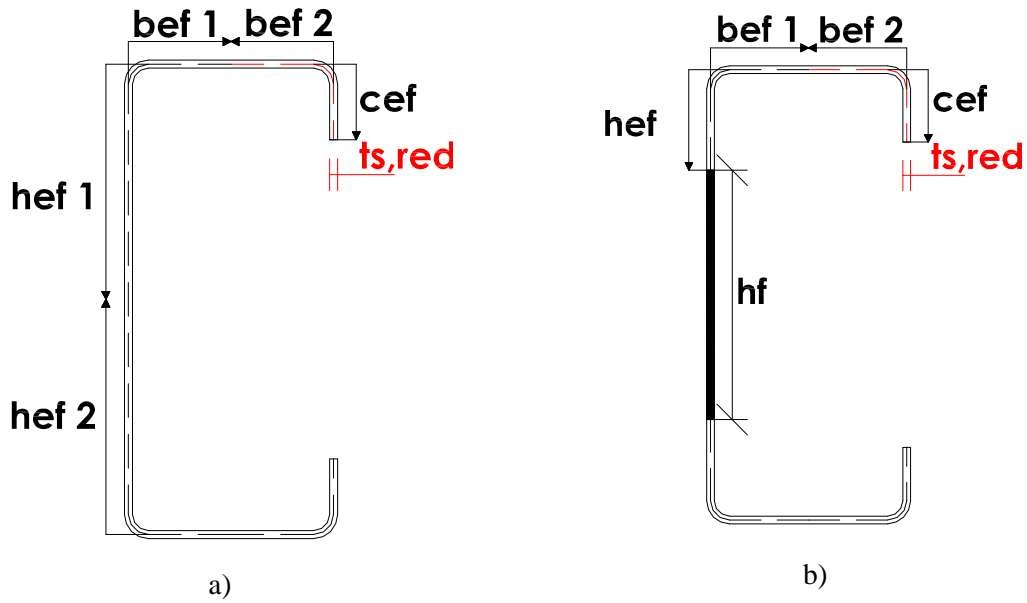


Figura 3-16: Variáveis utilizadas na ferramenta para a definição da secção efetiva: a) secção sem abertura, submetida à flexão segundo o eixo de maior inércia e b) secção com abertura, submetida à flexão segundo o eixo de maior inércia.

Tabela 3-14: Expressões analíticas referentes às variáveis utilizadas na ferramenta para a definição da secção efetiva com e sem abertura.

Variáveis	Secção sem abertura	Secção com abertura
$b_{ef1}$	$b_{ef1} = 0.5 \times \rho \times b_p + g_r$ (3-61)	$b_{ef1} = 0.5 \times \rho \times b_p + g_r$ (3-62)
$b_{ef2}$	$b_{ef2} = 0.5 \times \rho \times b_p + g_r$ (3-63)	$b_{ef2} = 0.5 \times \rho \times b_p + g_r$ (3-64)
$h_{ef1}/h_{ef}$	$h_{ef1} = 0.4 \times \frac{\rho \times h_p}{(1 - \psi)} + g_r$ (3-65)	$h_{ef} = \rho \times h_{p1} + g_r$ (3-66)
$h_{ef2}$	$h_{ef2} = 0.6 \times \frac{\rho \times h_p}{(1 - \psi)} + g_r + \left( h_p - \frac{h_p}{(1 - \psi)} \right)$ (3-67)	-
$c_{ef}$	$c_{ef} = \rho \times c_p + g_r$ (3-68)	$c_{ef} = \rho \times c_p + g_r$ (3-69)

Tabela 3-15: Características efetivas e capacidade resistente da secção transversal – secção sem abertura.

Área efetiva	$A_{eff} = t \times [c_p + b_p + (h_{ef2} - g_r) + (h_{ef1} - g_r) + (b_{ef1} - g_r) + 3 \times u] + t_{s,red} \times [u + (b_{ef2} - g_r) + (c_{ef} - g_r)]$	(3-70)
Centro de gravidade em relação ao banzo de compressão	$z_1 = \frac{1}{A_{eff}} \times \left[ c_p \times t \times \left( h_c - g_r - \frac{c_p}{2} \right) + b_p \times t \times h_c + 2 \times u \times t \times (h_c - w) + (h_{ef2} - g_r) \times t \times \left( h_c - g_r - \frac{h_{ef2} - g_r}{2} \right) + (h_{ef1} - g_r) \times t \times \left( \frac{h_{ef1} - g_r}{2} + g_r \right) + (c_{ef} - g_r) \times t_{s,red} \times \left( \frac{c_{ef} - g_r}{2} + g_r \right) + u \times t \times w + u \times t_{s,red} \times w \right]$	(3-71)
Altura complementar a $z_1$	$z_2 = (h_c - z_1)$	(3-72)
Inércia efetiva em torno do eixo $y_G$	$I_{eff,y} = \frac{c_p^3 \times t}{12} + c_p \times t \times \left( z_2 - c_c + \frac{c_p}{2} \right)^2 + \frac{b_p \times t^3}{12} + b_p \times t \times (z_2)^2 + 2 \times u \times t \times (z_2 - w)^2 + \frac{(h_{ef2} - g_r)^3 \times t}{12} + (h_{ef2} - g_r) \times t \times \left( z_2 - g_r - \frac{h_{ef2} - g_r}{2} \right)^2 + \frac{(h_{ef1} - g_r)^3 \times t}{12} + (h_{ef1} - g_r) \times t \times \left( z_1 - g_r - \frac{h_{ef1} - g_r}{2} \right)^2 + u \times t \times (z_1 - w)^2 + \frac{(b_{ef1} - g_r) \times t^3}{12} + (b_{ef1} - g_r) \times t \times (z_1)^2 + \frac{(b_{ef2} - g_r) \times t_{s,red}}{12} + (b_{ef2} - g_r) \times t_{s,red} \times (z_1)^2 + \frac{(c_{ef} - g_r)^3 \times t_{s,red}}{12} + (c_{ef} - g_r) \times t_{s,red} \times \left( z_1 - c_c + \frac{c_{ef} - g_r}{2} \right)^2 + u \times t_{s,red} \times (z_1 - w)^2$	(3-73)
Módulo de flexão mínimo em torno de $y_G$	$w_{eff,y} = \frac{I_{eff,y}}{z_1}$	(3-74)
Momento resistente	$M_{c,rd} = \frac{f_y \times w_{eff,y}}{\gamma_{m0}}$	(3-75)

Tabela 3-16: Características efetivas e capacidade resistente da secção transversal – secção com abertura.

Área efetiva	$A_{eff} = t \times [c_p + b_p + h_{p1} + (h_{ef} - g_r) + (b_{ef1} - g_r) + 3 \times u] + t_{s,red} \times [u + (b_{ef2} - g_r) + (c_{ef} - g_r)]$	(3-76)
Centro de gravidade em relação ao banzo de compressão	$z_1 = \frac{1}{A_{eff}} \times \left[ c_p \times t \times \left( h_c - g_r - \frac{c_p}{2} \right) + b_p \times t \times h_c + 2 \times u \times t \times (h_c - w) + h_{p1} \times t \times \left( h_c - g_r - \frac{h_{p1}}{2} \right) + (h_{ef} - g_r) \times t \times \left( \frac{h_{ef} - g_r}{2} + g_r \right) + (c_{ef} - g_r) \times t_{s,red} \times \left( \frac{c_{ef} - g_r}{2} + g_r \right) + u \times t \times w + u \times t_{s,red} \times w \right]$	(3-77)
Altura complementar a $z_1$	$z_2 = (h_c - z_1)$	(3-78)
Inércia efetiva em torno do eixo $y_G$	$I_{eff,y} = \frac{c_p^3 \times t}{12} + c_p \times t \times \left( z_2 - c_c + \frac{c_p}{2} \right)^2 + \frac{b_p \times t^3}{12} + b_p \times t \times (z_2)^2 + 2 \times u \times t \times (z_2 - w)^2 + \frac{(h_{p1})^3 \times t}{12} + h_{p1} \times t \times \left( z_2 - g_r - \frac{h_{p1}}{2} \right)^2 + \frac{(h_{ef} - g_r)^3 \times t}{12} + (h_{ef} - g_r) \times t \times \left( z_1 - g_r - \frac{h_{ef} - g_r}{2} \right)^2 + u \times t \times (z_1 - w)^2 + \frac{(b_{ef1} - g_r) \times t^3}{12} + (b_{ef1} - g_r) \times t \times (z_1)^2 + \frac{(b_{ef2} - g_r) \times t_{s,red}^3}{12} + (b_{ef2} - g_r) \times t_{s,red} \times (z_1)^2 + \frac{(c_{ef} - g_r)^3 \times t_{s,red}}{12} + (c_{ef} - g_r) \times t_{s,red} \times \left( z_1 - c_c + \frac{c_{ef} - g_r}{2} \right)^2 + u \times t_{s,red} \times (z_1 - w)^2$	(3-79)
Módulo de flexão mínimo em torno de $y_G$	$w_{eff,y} = \frac{I_{eff,y}}{z_1}$	(3-80)
Momento resistente	$M_{c,rd} = \frac{f_y \times w_{eff,y}}{\gamma_{m0}}$	(3-81)

Secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura:

Na secção transversal em causa, o bordo reentrante ao longo da abertura foi implementado na ferramenta como totalmente efetivo, porque apesar de uma das partes do bordo estar sob compressão, esta encontra-se próxima do centro de gravidade da secção o que faz com que a redução da secção efetiva desta zona não seja significativa. Este pressuposto encontra-se representado de forma esquemática na Figura 3-17, onde a Zona 1 identificada é totalmente efetiva para o caso de uma flexão positiva (trações na zona inferior e compressões na zona superior).

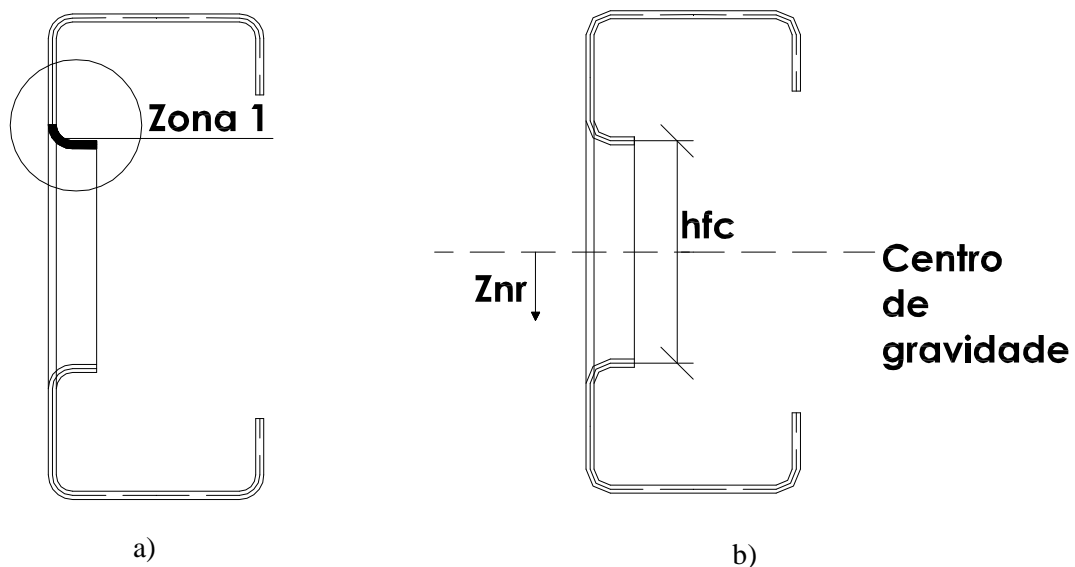


Figura 3-17: Representação esquemática: a) zona reentrante assumida como totalmente efetiva na ferramenta de cálculo, para flexão positiva e b) parâmetro  $Z_{nr}$ , referente à mudança de centro de gravidade, para flexão positiva.

A metodologia adotada para a determinação da largura efetiva do banzo superior e da largura efetiva e espessura do bordo de reforço é igual à adotada para a secção totalmente comprimida.

Para a quantificação da altura efetiva dos elementos que compõem a alma, considerou-se que cada elemento é um elemento interno, pelo facto de estes se encontrarem entre o banzo e o bordo reentrante. A ferramenta só é válida quando se cumpre a condição (3-82). Esta condição está relacionada com o comprimento transversal da abertura. Assim, a ferramenta só é adequada quando uma das partes da secção, acima ou abaixo da abertura está totalmente tracionada ou totalmente comprimida. Na determinação do fator de encurvadura,  $k_{\sigma}$ , dado na Tabela A1-1 do Anexo A, considera-se o valor unitário para

parâmetro que relaciona as tensões máximas de tração e de compressão,  $\psi$ , desta forma, garantem-se as condições de segurança.

$$|Z_{nr}| < \left| \frac{h_{fc} - t}{2} \right| \quad (3-82)$$

Tal como nos casos anteriores, a ferramenta quantifica os seguintes parâmetros: área efetiva, inércia efetiva em torno do eixo de maior inércia, módulo de flexão mínimo e momento resistente.

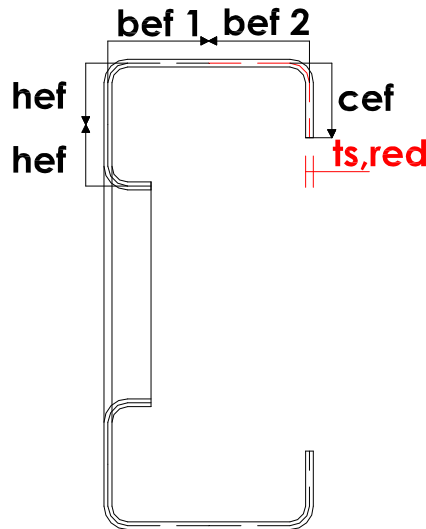


Figura 3-18: Variáveis utilizadas para a definição da secção efetiva. Secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, submetida à flexão positiva segundo o eixo de maior de inércia.

Tabela 3-17: Expressões analíticas referentes às variáveis utilizadas na ferramenta para a definição da secção efetiva com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura.

Variáveis	Secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura	
$b_{ef1}$	$b_{ef1} = 0.5 \times \rho \times b_p + g_r$	(3-83)
$b_{ef2}$	$b_{ef2} = 0.5 \times \rho \times b_p + g_r$	(3-84)
$h_{ef}$	$h_{ef} = 0.5 \times \rho \times h_{p1} + g_r$	(3-85)
$c_{ef}$	$c_{ef} = \rho \times c_p + g_r$	(3-86)

Tabela 3-18: Características efetivas e capacidade resistente da secção transversal – secção com abertura de bordo reentrante ao longo da abertura.

Área efetiva	$A_{eff} = t \times [c_p + b_p + h_{p1} + 2 \times f_p + (h_{ef} - g_r) \times 2 + (b_{ef1} - g_r) + 5 \times u] + t_{s,red} \times [u + (b_{ef2} - g_r) + (c_{ef} - g_r)]$	(3-87)
Centro de gravidade em relação ao banzo de compressão	$z_1 = \frac{1}{A_{eff}} \times \left[ c_p \times t \times \left( h_c - g_r - \frac{c_p}{2} \right) + b_p \times t \times h_c + 2 \times u \times t \times (h_c - w) + h_{p1} \times t \times \left( h_c - g_r - \frac{h_{p1}}{2} \right) + f_p \times t \times (h_c - h_{p1c}) + u \times t \times (h_c - h_{p1c} + w) + f_p \times t \times h_{p1c} + u \times t \times (h_{p1c} - w) + (h_{ef} - g_r) \times t \times \left( h_{p1c} - g_r - \frac{h_{ef} - g_r}{2} \right) + (h_{ef} - g_r) \times t \times \left( g_r + \frac{h_{ef} - g_r}{2} \right) + (c_{ef} - g_r) \times t_{s,red} \times \left( \frac{c_{ef} - g_r}{2} + g_r \right) + u \times t \times w + u \times t_{s,red} \times w \right]$	(3-88)
Altura complementar a $z_1$	$z_2 = (h_c - z_1)$	(3-89)
Inércia efetiva em torno do eixo $y_G$	$I_{eff,y} = \frac{c_p^3 \times t}{12} + c_p \times t \times \left( z_2 - c_c + \frac{c_p}{2} \right)^2 + \frac{b_p \times t^3}{12} + b_p \times t \times (z_2)^2 + 2 \times u \times t \times (z_2 - w)^2 + \frac{h_{p1}^3 \times t}{12} + h_{p1} \times t \times \left( z_2 - g_r - \frac{h_{p1}}{2} \right)^2 + u \times t \times (z_2 - h_{p1c} + w)^2 + \frac{f_p \times t^3}{12} + f_p \times t \times (z_2 - h_{p1c})^2 + \frac{f_p \times t^3}{12} + f_p \times t \times (z_1 - h_{p1c})^2 + u \times t \times (z_1 - h_{p1c} + w)^2 + \frac{(h_{ef} - g_r)^3 \times t}{12} + (h_{ef} - g_r) \times t \times \left( z_1 - h_{p1c} + g_r + \frac{h_{ef} - g_r}{2} \right)^2 + \frac{(h_{ef} - g_r)^3 \times t}{12} + (h_{ef} - g_r) \times t \times \left( z_1 - g_r - \frac{h_{ef} - g_r}{2} \right)^2 + u \times t \times (z_1 - w)^2 + \frac{(b_{ef1} - g_r) \times t^3}{12} + (b_{ef1} - g_r) \times t \times (z_1)^2 + \frac{(b_{ef2} - g_r) \times t_{s,red}^3}{12} + (b_{ef2} - g_r) \times t_{s,red} \times (z_1)^2 + \frac{(c_{ef} - g_r)^3 \times t_{s,red}}{12} + (c_{ef} - g_r) \times t_{s,red} \times \left( z_1 - g_r - \frac{c_{ef} - g_r}{2} \right)^2 + u \times t_{s,red} \times (z_1 - w)^2$	(3-90)
Mínimo módulo de flexão $y_G$	$w_{eff,y} = \frac{I_{eff,y}}{z_1}$	(3-91)



Momento resistente	$M_{c,rd} = \frac{f_y \times w_{eff,y}}{\gamma_{m0}}$	(3-92)
--------------------	---	--------

### 3.6 Propriedades efetivas – secções submetidas ao esforço transversal

A ferramenta de cálculo permite determinar a capacidade resistente ao esforço transversal da secção transversal sem aberturas e sem reforços longitudinais na alma. De acordo com a EN 1993-1-3, o esforço transversal resistente é dado pela expressão (3-93),

$$V_{b,rd} = \frac{\frac{h_w}{\sin \Phi}}{\gamma_{m0}} \times t \times f_{bv} \quad (3-93)$$

em que,

$h_w$  corresponde à altura da alma medida entre a linha media dos banzos (ver Figura 3-19);

$\Phi$  corresponde ao angulo entre a alma e o banzo (ver Figura 3-19 );

$f_{bv}$  é o valor da tensão resistente ao esforço transversal com a influência da encurvadura por corte.

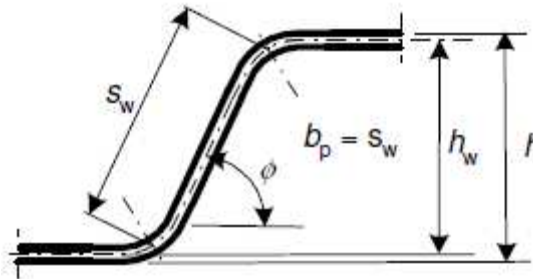


Figura 3-19: Representação dos parâmetros  $h_w$  e  $\Phi$  (EN 1993-1-3, 2006).

A tensão resistente ao esforço transversal  $f_{bv}$  depende da esbelteza normalizada ao esforço transversal e da presença ou não de reforços nos apoios, esta tensão é dada na tabela 6.1 da EN 1993-1-3. Uma vez que os perfis em estudo não apresentam reforços longitudinais na alma, o coeficiente de esbelteza é dado pela expressão (3-94), onde  $s_w$  corresponde à altura da alma medida entre pontos intermédios dos cantos arredondados. A ferramenta considera a possibilidade de colocar ou não reforços nos apoios.

$$\bar{\lambda}_w = 0.346 \times \frac{s_w}{t} \times \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (3-94)$$

### 3.7 Resultados

Na Tabela 3-19, na Tabela 3-20 e na Tabela 3-21 apresentam-se as características mecânicas das secções transversais em estudo, submetidas à compressão, considerando a secção na sua totalidade e a secção efetiva. Apresenta-se também para cada secção transversal em estudo, os parâmetros de entrada referentes à geometria, às propriedades do material e às propriedades efetivas para atender ao cálculo da secção efetiva. As características mecânicas da secção transversal sem aberturas, submetida à compressão, considerando a secção na sua totalidade e a secção efetiva, são validadas de acordo com a publicação “Worked examples according to EN 1993-1-3”, (ECCS Technical Committee 7 Cold-formed Steel, 2008).

Através da Tabela 3-19, verifica-se que todas as secções transversais sofrem uma redução da secção, ou seja, a sua área efetiva,  $A_{eff}$  é inferior à área bruta,  $A_g$ . O parâmetro que contribui para essa redução da secção é a altura da alma,  $h_{ef}$ , pois as restantes propriedades efetivas, como: a largura do banzo,  $b_{ef1}$  e  $b_{ef2}$ , do bordo de reforço,  $c_{ef}$ , e a espessura do bordo de reforço,  $t_{s,red}$ , não sofrem redução.

Na Tabela 3-20 referente à secção transversal com abertura à compressão, observa-se também que todas as secções transversais sofrem redução da secção, com a área efetiva,  $A_{eff}$ , a ficar inferior à área bruta,  $A_g$ . Tal como no caso anterior, não se observa uma redução das seguintes propriedades efetivas: largura do banzo,  $b_{ef1}$  e  $b_{ef2}$ , do bordo de reforço,  $c_{ef}$  e da espessura do bordo de reforço,  $t_{s,red}$ .

Comparando o esforço axial resistente entre as secções transversais sem abertura e as secções transversais com abertura, verifica-se que a presença da abertura nas secções afeta a sua capacidade resistente, pois todas as secções transversais sem abertura apresentam um esforço axial resistente superior ao das secções transversais com abertura.

Tabela 3-19: Características mecânicas das secções sem abertura, submetidas à compressão.

	Tipo de perfil							
Parâmetros	EMC 90×1.2	EMC 90×1.5	EMC 120×1.5	EMC 150×1.5	EMC 200×2	EMC 200×2.5	EMC 250×2.5	EMC 300×2.5
$h$ (mm)	90.00	90.00	120.00	150.00	200.00	200.00	250.00	300.00
$b$ (mm)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
$c$ (mm)	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
$t_n$ (mm)	1.20	1.50	1.50	1.50	2.00	2.50	2.50	2.50
$t_{zinc}$ (mm)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
$r_i$ (mm)	2.00	2.00	2.50	2.50	2.00	2.00	2.50	2.50
$f_y$ (MPa)	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00
$Z_g$ (mm)	44.42	44.27	59.27	74.27	99.02	98.77	123.77	148.77
$Y_g$ (mm)	13.75	13.63	11.95	10.61	8.72	8.57	7.45	6.56
$A_g$ (mm <sup>2</sup> )	238.50	299.29	345.97	389.77	615.40	769.89	897.74	1020.74
$I_{yg}$ (mm <sup>4</sup> )	314480.83	392154.05	773836.76	1306371.05	3416754.40	4251731.49	7404451.78	11635622.16
$I_{zg}$ (mm <sup>4</sup> )	59020.51	72913.48	80902.25	86463.02	120167.17	146114.80	155658.70	161732.27
$h_{ef}$ (mm)	26.35	31.49	33.49	34.61	46.04	55.74	57.76	59.00
$b_{ef1}$ (mm)	19.42	19.27	19.27	19.27	19.02	18.77	18.77	18.77
$b_{ef2}$ (mm)	19.42	19.27	19.27	19.27	19.02	18.77	18.77	18.77
$c_{ef}$ (mm)	14.42	14.27	14.27	14.27	14.02	13.77	13.77	13.77
$t_{s,red}$ (mm)	1.16	1.46	1.46	1.46	1.96	2.46	2.46	2.46
$A_{eff}$ (mm <sup>2</sup> )	196.58	261.97	270.71	273.96	407.74	558.20	572.95	579.07
$N_{c,rd}$ (kN)	55.04	73.35	75.80	76.71	114.17	156.30	160.43	162.14

Tabela 3-20: Características mecânicas das secções com abertura, submetidas à compressão.

Parâmetros	Tipo de perfil							
	EMC 90×1.2	EMC 90×1.5	EMC 120×1.5	EMC 150×1.5	EMC 200×2	EMC 200×2.5	EMC 250×2.5	EMC 300×2.5
$h$ (mm)	90.00	90.00	120.00	150.00	200.00	200.00	250.00	300.00
$b$ (mm)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
$c$ (mm)	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
$h_f$ (mm)	46.00	46.00	46.00	91.00	91.00	91.00	142.50	142.50
$t_n$ (mm)	1.20	1.50	1.50	1.50	2.00	2.50	2.50	2.50
$t_{zinc}$ (mm)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
$r_i$ (mm)	2.00	2.00	2.50	2.50	2.00	2.00	2.50	2.50
$f_y$ (MPa)	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00
$A_f$ (mm <sup>2</sup> )	53.36	67.16	67.16	132.86	178.36	223.86	350.55	350.55
$A_g$ (mm <sup>2</sup> )	185.14	232.13	278.81	256.91	437.04	546.03	547.19	670.19
$Z_g$ (mm)	44.42	44.27	59.27	74.27	99.02	98.77	123.77	148.77
$Y_g$ (mm)	17.72	17.57	14.83	16.09	12.28	12.09	12.23	9.99
$I_{yg}$ (mm <sup>4</sup> )	305071.68	380311.50	761994.21	1214686.58	3293671.13	4097249.44	6811255.45	11042425.84
$I_{zg}$ (mm <sup>4</sup> )	46013.26	56815.35	68987.10	63756.18	101004.71	122796.75	123521.92	138605.49
$h_{ef}$ (mm)	16.99	20.01	22.56	21.67	30.32	36.59	36.63	38.74
$b_{ef1}$ (mm)	19.42	19.27	19.27	19.27	19.02	18.77	18.77	18.77
$b_{ef2}$ (mm)	19.42	19.27	19.27	19.27	19.02	18.77	18.77	18.77
$c_{ef}$ (mm)	14.42	14.27	14.27	14.27	14.02	13.77	13.77	13.77
$t_{s,red}$ (mm)	1.16	1.46	1.46	1.46	1.96	2.46	2.46	2.46
$A_{eff}$ (mm <sup>2</sup> )	174.86	228.47	238.77	236.17	346.12	463.98	469.00	479.37
$N_{c,rd}$ (kN)	48.96	63.97	66.86	66.13	96.91	129.91	131.32	134.22

Nas secções transversais com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura não se observa uma redução das secções, (consultar Tabela 3-21), pois o bordo reentrante ao longo da abertura e os elementos que compõem a alma também não apresentam redução das suas propriedades efetivas.

O esforço axial resistente das secções com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura é, em todas as secções transversais de estudo, superior ao caso das secções sem abertura. Têm-se áreas efetivas nas secções transversais com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, superiores aos casos de secções sem abertura, o que revela que a presença do bordo de reforço ao longo da abertura está na origem deste aumento da capacidade

resistência à compressão. Os elementos que compõem a alma da secção transversal com abertura de bordo reentrante, apesar de estarem condicionados pela presença da abertura, são considerados como elementos internos, tal como a alma da secção sem abertura mas com menor esbelteza,  $\bar{\lambda}_p$  (ver expressão A1-5 do Anexo A), logo, menor coeficiente de redução,  $\rho$  (ver Tabela A1-1 do Anexo A).

Tabela 3-21: Características mecânicas das secções com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, submetidas à compressão.

Parâmetros	Tipo de perfil							
	EMC 90×1.2	EMC 90×1.5	EMC 120×1.5	EMC 150×1.5	EMC 200×2	EMC 200×2.5	EMC 250×2.5	EMC 300×2.5
$h$ (mm)	90.00	90.00	120.00	150.00	200.00	200.00	250.00	300.00
$b$ (mm)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
$c$ (mm)	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
$t_n$ (mm)	1.20	1.50	1.50	1.50	2.00	2.50	2.50	2.50
$t_{zinc}$ (mm)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
$r_i$ (mm)	2.00	2.00	2.50	2.50	2.00	2.00	2.50	2.50
$f_c$ (mm)	8.40	8.25	9.25	9.75	9.50	9.25	13.75	13.75
$h_{ic}$ (mm)	41.20	41.50	41.50	84.50	85.00	85.50	135.00	135.00
$f_y$ (MPa)	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00
$A_g$ (mm <sup>2</sup> )	216.14	270.70	321.74	304.22	497.62	620.82	651.46	774.46
$Z_g$ (mm)	44.42	44.27	59.27	74.27	99.02	98.77	123.77	148.77
$Y_g$ (mm)	15.59	15.48	13.29	14.10	11.18	11.02	11.04	9.29
$I_{yg}$ (mm <sup>4</sup> )	318862.59	397735.12	781494.25	1301869.10	3406248.28	4237955.20	7296116.04	11527286.43
$I_{zg}$ (mm <sup>4</sup> )	52041.36	64197.22	74268.66	70733.82	105880.11	128596.89	130252.75	142931.18
$h_{ef}$ (mm)	11.91	11.76	19.26	16.01	28.26	28.01	28.14	40.64
$b_{ef1}$ (mm)	19.42	19.27	19.27	19.27	19.02	18.77	18.77	18.77
$b_{ef2}$ (mm)	19.42	19.27	19.27	19.27	19.02	18.77	18.77	18.77
$c_{ef}$ (mm)	14.42	14.27	14.27	14.27	14.02	13.77	13.77	13.77
$f_{ef}$ (mm)	8.40	8.25	9.25	9.75	9.50	9.25	13.75	13.75
$t_{s,red}$ (mm)	1.16	1.46	1.46	1.46	1.96	2.46	2.46	2.46
$t_{s,redi}$ (mm)	1.16	1.46	1.46	1.46	1.96	2.46	2.46	2.46
$A_{eff}$ (mm <sup>2</sup> )	216.14	270.70	321.74	304.22	497.62	620.82	651.46	774.46
$N_{c,rd}$ (kN)	60.52	75.80	90.09	85.18	139.33	173.83	182.41	216.85

Na Tabela 3-22, Tabela 3-23 e Tabela 3-24 apresentam-se as características mecânicas das secções transversais em estudo, submetidas à flexão, considerando a secção na sua totalidade e a secção efetiva. As características mecânicas da secção transversal sem abertura, submetida à flexão, são validadas de acordo com a publicação "Worked examples according to EN 1993-1-3", (ECCS Technical Committee 7 Cold-formed Steel, 2008).

Através da Tabela 3-22 constata-se que apenas a secção transversal referente ao perfil EMC 300×2.5 tem uma redução da inércia, pois a inércia da secção transversal efetiva,  $I_{eff,y}$  é inferior à inércia bruta,  $I_{yg}$ . Esta redução da inércia deve-se à diminuição da propriedade efetiva, referente à altura da alma,  $h_{ef1}$  e  $h_{ef2}$ . Nas propriedades efetivas referentes à largura do banzo,  $b_{ef1}$  e  $b_{ef2}$ , largura do bordo de reforço,  $c_{ef}$ , e a espessura do bordo de reforço,  $t_{s,red}$ , não se verifica a redução.

Na Tabela 3-23, referente à secção com aberturas submetida à flexão, verifica-se que todas as secções transversais em estudo apresentam uma redução da inércia, com a inércia da secção transversal efetiva,  $I_{eff,y}$  inferior à inércia bruta,  $I_{yg}$ . A altura efetiva referente ao elemento da alma,  $h_{ef}$ , é o parâmetro que contribui para a redução da inércia. As restantes partes da secção não apresentam redução.

Verifica-se que a presença da abertura nas secções afeta a sua capacidade resistente, pois todas as secções transversais sem abertura apresentam um momento resistente superior ao das secções transversais com abertura simples.

Tabela 3-22: Características mecânicas das secções sem abertura, submetidas à flexão.

Parâmetros	Tipo de perfil							
	EMC 90×1.2	EMC 90×1.5	EMC 120×1.5	EMC 150×1.5	EMC 200×2	EMC 200×2.5	EMC 250×2.5	EMC 300×2.5
$h$ (mm)	90.00	90.00	120.00	150.00	200.00	200.00	250.00	300.00
$b$ (mm)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
$c$ (mm)	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
$t_h$ (mm)	1.20	1.50	1.50	1.50	2.00	2.50	2.50	2.50
$t_{zinc}$ (mm)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
$r_f$ (mm)	2.00	2.00	2.50	2.50	2.00	2.00	2.50	2.50
$f_y$ (MPa)	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00
$Z_g$ (mm)	44.42	44.27	59.27	74.27	99.02	98.77	123.77	148.77
$Y_g$ (mm)	13.75	13.63	11.95	10.61	8.72	8.57	7.45	6.56
$A_g$ (mm <sup>2</sup> )	238.50	299.29	345.97	389.77	615.40	769.89	897.74	1020.74
$I_{yg}$ (mm <sup>4</sup> )	314480.83	392154.05	773836.76	1306371.05	3416754.40	4251731.49	7404451.78	11635622.16
$I_{zg}$ (mm <sup>4</sup> )	59020.51	72913.48	80902.25	86463.02	120167.17	146114.80	155658.70	161732.27
$h_{ef1}$ (mm)	18.22	18.19	24.28	30.28	40.14	40.08	50.17	56.39
$h_{ef2}$ (mm)	70.62	70.35	94.26	118.26	157.90	157.46	197.37	231.70
$b_{ef1}$ (mm)	19.42	19.27	19.27	19.27	19.02	18.77	18.77	18.77
$b_{ef2}$ (mm)	19.42	19.27	19.27	19.27	19.02	18.77	18.77	18.77
$c_{ef}$ (mm)	14.42	14.27	14.27	14.27	14.02	13.77	13.77	13.77
$t_{s,red}$ (mm)	1.16	1.46	1.46	1.46	1.96	2.46	2.46	2.46
$A_{eff}$ (mm <sup>2</sup> )	238.50	299.29	345.97	389.77	615.40	769.89	897.74	997.48
$I_{eff,y}$ (mm <sup>4</sup> )	314480.83	392154.05	773836.76	1306371.05	3416754.40	4251731.49	7404451.78	11452586.36
$Z1$ (mm)	44.42	44.27	59.27	74.27	99.02	98.77	123.77	150.81
$W_{eff,y}$ (mm <sup>3</sup> )	7079.71	8858.23	13056.13	17589.48	34505.70	43046.79	59824.29	75938.63
$M_{c,rd}$ (kNm)	1.98	2.48	3.66	4.93	9.66	12.05	16.75	21.26

Tabela 3-23: Características mecânicas das secções com abertura, submetidas à flexão.

	Tipo de perfil							
Parâmetros	EMC 90×1.2	EMC 90×1.5	EMC 120×1.5	EMC 150×1.5	EMC 200×2	EMC 200×2.5	EMC 250×2.5	EMC 300×2.5
$h$ (mm)	90.00	90.00	120.00	150.00	200.00	200.00	250.00	300.00
$b$ (mm)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
$c$ (mm)	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
$h_f$ (mm)	46.00	46.00	46.00	91.00	91.00	91.00	142.50	142.50
$t_n$ (mm)	1.20	1.50	1.50	1.50	2.00	2.50	2.50	2.50
$t_{zinc}$ (mm)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
$r_i$ (mm)	2.00	2.00	2.50	2.50	2.00	2.00	2.50	2.50
$f_y$ (MPa)	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00
$A_f$ (mm <sup>2</sup> )	53.36	67.16	67.16	132.86	178.36	223.86	350.55	350.55
$A_g$ (mm <sup>2</sup> )	185.14	232.13	278.81	256.91	437.04	546.03	547.19	670.19
$Z_g$ (mm)	44.42	44.27	59.27	74.27	99.02	98.77	123.77	14877
$Y_g$ (mm)	17.72	17.57	14.83	16.09	12.28	12.09	12.23	9.99
$I_{yg}$ (mm <sup>4</sup> )	305071.68	380311.50	761994.21	1214686.58	3293671.13	4097249.44	6811255.45	11042425.84
$I_{zg}$ (mm <sup>4</sup> )	46013.26	56815.35	68987.10	63756.18	101004.71	122796.75	123521.92	138605.49
$h_{ef}$ (mm)	16.99	20.01	22.56	21.67	30.32	36.59	36.63	38.74
$b_{ef1}$ (mm)	19.42	19.27	19.27	19.27	19.02	18.77	18.77	18.77
$b_{ef2}$ (mm)	19.42	19.27	19.27	19.27	19.02	18.77	18.77	18.77
$c_{ef}$ (mm)	14.42	14.27	14.27	14.27	14.02	13.77	13.77	13.77
$t_{s,red}$ (mm)	1.16	1.46	1.46	1.46	1.96	2.46	2.46	2.46
$A_{eff}$ (mm <sup>2</sup> )	180.00	230.30	258.79	246.54	39158	505.01	508.10	574.78
$I_{eff,y}$ (mm <sup>4</sup> )	301700.92	379279.94	742455.83	1188645.61	3126212.24	3967716.48	6546377.90	10116449.32
$Z_1$ (mm)	45.14	44.46	61.58	76.33	105.65	103.14	129.86	163.82
$W_{eff,y}$ (mm <sup>3</sup> )	6683.64	8531.19	12056.86	15571.84	29590.54	38467.79	50409.75	61754.91
$M_{c,rd}$ (kNm)	1.87	2.39	3.38	4.36	8.29	10.77	14.11	17.29



Na secção transversal com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, submetida à flexão, não se observa uma redução da secção, ficando a inércia da secção transversal bruta,  $I_{yg}$  igual à inércia da secção efetiva,  $I_{eff,y}$  (consultar Tabela 3-24). Não existe redução das seguintes propriedades efetivas: largura do banzo,  $b_{ef1}$  e  $b_{ef2}$ , bordo de reforço,  $c_{ef}$  e da espessura do bordo de reforço,  $t_{s,red}$ , tal como, os casos anteriores (secção sem abertura e secção com abertura). A propriedade efetiva referente ao elemento da alma,  $h_{ef}$ , também não apresenta redução.

O momento resistente das secções transversais com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura é superior ao momento resistente das secções com abertura simples. Na primeira situação, consideraram-se os elementos que compõem a alma como internos, ao contrário do que acontece com a secção transversal com abertura simples, onde se consideraram as partes da alma como elementos externos.

Comparando a capacidade resistente à flexão das secções transversais sem abertura com a capacidade resistente à flexão das secções com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, verifica-se que:

- ✓ As secções transversais sem abertura referentes aos perfis EMC 90×1.5, EMC 90×1.2, EMC 120×1.5 e EMC 300×2.5 apresentam um momento resistente inferior às correspondentes secções com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura;
- ✓ A secção transversal sem abertura referente ao perfil EMC 250×2.5 apresenta um momento resistente superior ao da correspondente secção com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura;
- ✓ As secções transversais sem abertura, referentes aos perfis EMC 150×1.5, EMC 200×2 e EMC 200×2.5 apresentam um momento resistente próximo dos casos de secção transversal com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, mas sempre com valores superiores.

Tabela 3-24: Características mecânicas das secções com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, submetidas à flexão.

	Tipo de perfil							
Parâmetros	EMC 90×1.2	EMC 90×1.5	EMC 120×1.5	EMC 150×1.5	EMC 200×2	EMC 200×2.5	EMC 250×2.5	EMC 300×2.5
$h$ (mm)	90.00	90.00	120.00	150.00	200.00	200.00	250.00	300.00
$b$ (mm)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
$c$ (mm)	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
$t_n$ (mm)	1.20	1.50	1.50	1.50	2.00	2.50	2.50	2.50
$t_{zinc}$ (mm)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
$r_f$ (mm)	2.00	2.00	2.50	2.50	2.00	2.00	2.50	2.50
$f_c$ (mm)	8.40	8.25	9.25	9.75	9.50	9.25	13.75	13.75
$h_{fc}$ (mm)	41.20	41.50	41.50	84.50	85.00	85.50	135.00	135.00
$f_y$ (MPa)	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00
$A_g$ (mm <sup>2</sup> )	216.14	270.70	321.74	304.22	497.62	620.82	651.46	774.46
$Z_g$ (mm)	44.42	44.27	59.27	74.27	99.02	98.77	123.77	148.77
$Y_g$ (mm)	15.59	15.48	13.29	14.10	11.18	11.02	11.04	9.29
$I_{yg}$ (mm <sup>4</sup> )	318862.5 9	397735 .12	781494.2 5	1301869. 10	340624 8.28	4237955 .20	7296116. 04	11527286. 43
$I_{zg}$ (mm <sup>4</sup> )	52041.36	64197. 22	74268.66	70733.82	105880 .11	128596. 89	130252.7 5	142931.18
$h_{ef}$ (mm)	11.91	11.76	19.26	16.01	28.26	28.01	28.14	40.64
$b_{ef1}$ (mm)	19.42	19.27	19.27	19.27	19.02	18.77	18.77	18.77
$b_{ef2}$ (mm)	19.42	19.27	19.27	19.27	19.02	18.77	18.77	18.77
$c_{ef}$ (mm)	14.42	14.27	14.27	14.27	14.02	13.77	13.77	13.77
$t_{s,red}$ (mm)	1.16	1.46	1.46	1.46	1.96	2.46	2.46	2.46
$A_{eff}$ (mm <sup>2</sup> )	216.14	270.70	321.74	304.22	497.62	620.82	651.46	774.46
$I_{eff,y}$ (mm <sup>4</sup> )	318862.5 9	397735 .12	781494.2 5	1301869. 10	340624 8.28	4237955 .20	7296116. 04	11527286. 43
$Z_1$ (mm)	44.42	44.27	59.27	74.27	99.02	98.77	123.77	148.77
$W_{eff,y}$ (mm <sup>3</sup> )	7178.36	8984.3 0	13185.33	17528.87	34399. 60	42907.3 1	58948.99	77483.94
$M_{c,rd}$ (kNm)	2.01	2.52	3.69	4.91	9.63	12.01	16.51	21.70

Na Tabela 3-25 encontram-se os resultados referentes ao esforço transversal resistente, para a secção transversal sem abertura. Entre a secção transversal do perfil EMC 120×1.5 com o perfil EMC 150×1.5 e entre o perfil de EMC 200×2.5, EMC 250×2.5 e EMC300×2.5, denotam-se valores de esforço transversal resistente muito próximos, apesar de as secções transversais apresentarem alturas de alma diferentes. Esta proximidade do esforço transversal resistente está relacionada com as diferenças observadas no parâmetro,  $f_{bv}$ . Um outro aspeto importante corresponde ao aumento significativo do esforço transversal resistente entre as secções EMC90×1.2 e EMC 90×1.5 e entre as secções EMC200×2 EMC200×2.5, que se deve à influência do parâmetro,  $f_{bv}$ .

Tabela 3-25: Esforço transversal resistente - secção sem abertura.

Parâmetros	Tipo de perfil							
	EMC 90x1.2	EMC 90x1.5	EMC 120x1.5	EMC 150x1.5	EMC 200x2	EMC 200x2.5	EMC 250x2.5	EMC 300x2.5
$h$ (mm)	90.00	90.00	120.00	150.00	200.00	200.00	250.00	300.00
$b$ (mm)	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00	40.00
$c$ (mm)	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
$t_n$ (mm)	1.20	1.50	1.50	1.50	2.00	2.50	2.50	2.50
$t_{zinco}$ (mm)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
$r_i$ (mm)	2.00	2.00	2.50	2.50	2.00	2.00	2.50	2.50
$f_y$ (MPa)	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00	280.00
$h_w$ (mm)	88.84	88.54	118.54	148.54	198.04	197.54	247.54	297.54
$\bar{\lambda}_w$	0.95	0.75	1.01	1.27	1.27	1.00	1.26	1.52
$f_{bv}$ (MPa)	141.32	162.40	133.16	105.92	106.23	133.76	106.66	88.61
$V_{b,rd}$ (kN)	14.56	20.99	23.05	22.97	41.23	65.00	64.95	64.85

#### **4. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE PERFIS METÁLICOS ENFORMADOS A FRIO COM SECÇÃO EM C, E ABERTURAS NA ALMA**

A campanha experimental descrita neste capítulo é definida e realizada com o objetivo de aferir o comportamento real dos elementos estruturais em estudo, quantificar a sua capacidade resistente e avaliar a sua rigidez. Os resultados obtidos são complementares aos resultados obtidos com a ferramenta de cálculo desenvolvida e apresentada no Capítulo 3, sendo mais tarde utilizados para validar e calibrar os modelos numéricos desenvolvidos no Capítulo 5.

Pretende-se conhecer o comportamento estrutural global dos perfis em estudo: os modos de instabilidade, comportamento em fase de rotura, comportamento elástico e capacidade de deformação. Um aspeto essencial é perceber qual a influência da furação existente na alma, pois a quantificação dessa contribuição não está explicitamente regulamentada na EN 1993-1-3. Em consequência, são efetuados ensaios em perfis com a furação definida no Capítulo 3 e em perfis com geometria idêntica, mas sem qualquer furação na alma, de modo a estudar a influência das aberturas no comportamento estrutural.

Tendo em conta estes objetivos procurou-se definir uma amostra para esta campanha experimental, selecionando-se dois tipos de perfis: EMC 90×1.5 e EMC 150×1.5 com alma cheia e alma com aberturas e bordo reentrante ao longo da abertura. Na seleção referida teve-se em conta que a duração desta campanha teria de ser compatível com o tempo disponível para a realização desta dissertação.

Nesta campanha experimental estudaram-se elementos solicitados à flexão segundo o eixo de maior inércia  $yy$ , e também segundo o eixo de menor inércia com banzo maior à tração e à compressão,  $z1$  e  $z2$ , respetivamente.

Descreve-se a metodologia empregue para a realização dos ensaios, os resultados obtidos e a análise de resultados. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

## 4.1 Previsão dos ensaios experimentais

Nesta campanha experimental, pretende-se que a resistência à flexão seja condicionante, de modo a permitir analisar o comportamento estrutural à flexão dos perfis metálicos em estudo. É de salientar que a ferramenta de cálculo analítica elaborada não prevê a quantificação da capacidade resistente das secções transversais para a flexão segundo o eixo de menor inércia. No entanto, a sua inclusão nesta campanha experimental é importante para se perceber o comportamento dos perfis em estudo quando são solicitados segundo o eixo de menor inércia.

O sistema estrutural adotado nos ensaios experimentais encontra-se representado na Figura 4-1. Foram aplicadas duas forças pontuais, tal como a EN 1993-1-3 sugere. A secção A.3.4 do Anexo A da EN 1993-1-3 refere que os pontos de aplicação das cargas pontuais se devem situar entre  $1/5$  e  $1/3$  do vão, originando um momento fletor uniforme no troço central. Tentou-se obter uma disposição de carregamento que corresponda ao que é sugerido na EN 1993-1-3. As dimensões indicadas para o sistema estrutural (ver Tabela 4-1) são definidas de acordo com várias condicionantes, como as dimensões do pórtico disponível para ser utilizado no estudo, a obtenção de vãos em que a resistência à flexão seja condicionante, a posição das aberturas, a aplicação das cargas pontuais em zonas de alma cheia, posicionadas entre aberturas.

Nos ensaios experimentais com solicitação segundo o eixo de maior inércia as forças serão aplicadas no centro de corte da secção transversal para evitar fenómenos de torção.

Os diagramas de esforço transversal e momento fletor correspondentes aos ensaios realizados são representados na Figura 4-2, sendo possível identificar as secções críticas. Para quantificar a carga de rotura, comparam-se os esforços aplicados nas secções críticas com a respetiva capacidade resistente (ver Tabela 4-2).

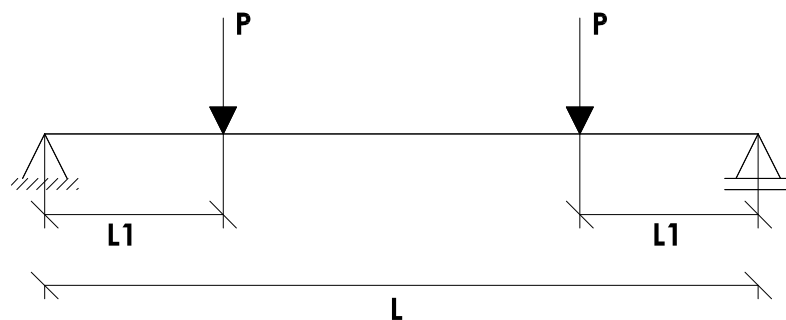


Figura 4-1: Sistema estrutural adotado nos ensaios de flexão.

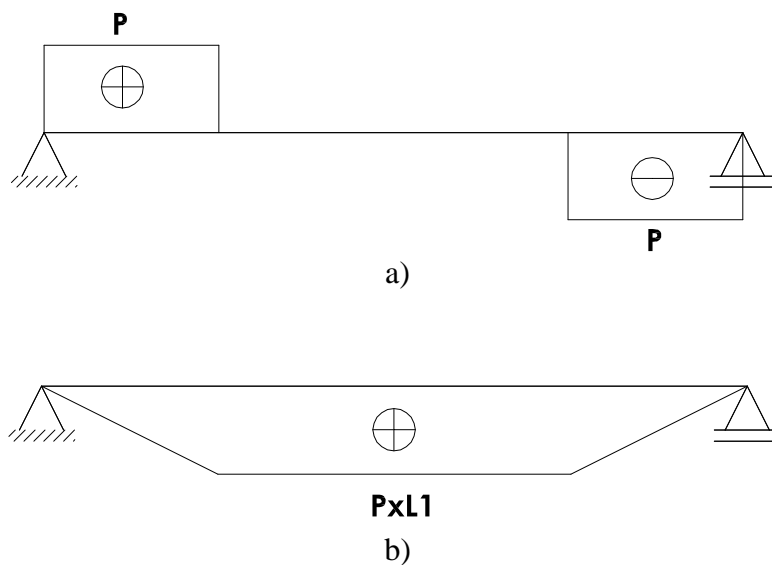


Figura 4-2: Diagramas de esforços – Ensaio de flexão: a) diagrama de esforço transversal e b) diagrama de momento fletor.

Tabela 4-1: Identificação das dimensões provenientes da previsão do comportamento à flexão.

Tipo de perfil	$L$ (mm)	$L/2$ (mm)
EMC 90x1.5	923	316
EMC 150x1.5	1428	495

Tabela 4-2: Resultado da previsão para a campanha experimental com solicitação segundo o eixo de maior inércia.

Tipo de perfil	$M_{Rd,y}$ (kNm)	$V_{Rd}$ (kN)	Carga de rotura por flexão (kN)	Carga de rotura por corte (kN)	Resistência condicionante
EMC 90x1.5 Sem abertura	2.48	20.99	7.85	20.99	Flexão
EMC 150x1.5 Sem abertura	4.93	22.97	10.0	22.97	Flexão

A resistência da secção transversal à flexão segundo o eixo de maior inércia, indicada na Tabela 4-2, é obtida a partir da ferramenta de cálculo analítica, assim como, a resistência ao corte para os perfis sem aberturas na alma. Como se pode observar na Tabela 4-2, a resistência condicionante para os dois tipos de perfil EMC 90×1.5 e EMC 150×1.5 é a resistência à flexão, tal como pretendido, uma vez que o valor das forças máximas condicionadas por  $M_{Rd}$  é inferior ao valor das forças máximas condicionadas por  $V_{Rd}$ .

A ferramenta de cálculo desenvolvida não prevê a resistência das secções transversais submetidas ao esforço de corte para o caso das secções com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, pois este valor não depende apenas da secção experimental com abertura e resulta do funcionamento conjunto das zonas com e sem abertura. Deste modo adotaram-se para os perfis de secção transversal com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, comprimentos iguais aos perfis com secção transversal sem abertura. Os comprimentos adotados para a previsão da flexão segundo o eixo de maior inércia serão também considerados para a flexão segundo o eixo menor inércia, com banzo maior à tração,  $z1$  e banzo maior à compressão,  $z2$ . Consideram-se comprimentos iguais para os dois tipos de solicitação, de modo a facilitar a montagem e preparação dos ensaios.

## 4.2 Caracterização mecânica do aço

O aço utilizado na produção dos perfis metálicos é do tipo S280GD. Para a sua caracterização mecânica foram realizados ensaios de tração de acordo com a norma NP EN 10002-1 (1990). As dimensões dos provetes ensaiados foram definidas de acordo com a referida norma para uma espessura nominal de 1.5 mm e encontram-se identificadas na Figura 4-3. Todos os provetes utilizados nestes ensaios de tração foram preparados e fornecidos pela empresa Estufas Minho S.A.

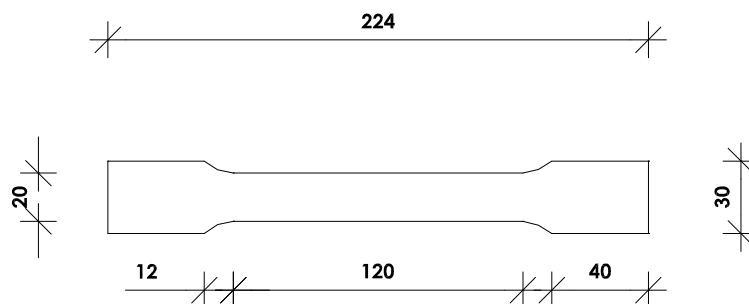


Figura 4-3: Dimensões dos provetes ensaiados.

Na execução dos ensaios, os provetes são fixos nas suas extremidades, nas cabeças de amarração. Os ensaios são realizados com controlo de deformação, e aplicando uma velocidade no atuador de 1 mm/min. São ensaiados 12 provetes. As respetivas dimensões das secções transversais (largura e espessura) são medidas em três posições da zona útil (ver Figura4-4). Na Tabela 4-3 encontram-se registados os resultados dessa medição, que foram obtidos com um paquímetro digital. Na Tabela 4-3 não se encontram identificados os dois primeiros provetes porque estes serviram de teste e os seus resultados foram eliminados. Ao longo dos ensaios foram registados os valores da força aplicada ao provete e o correspondente deslocamento das amarras.

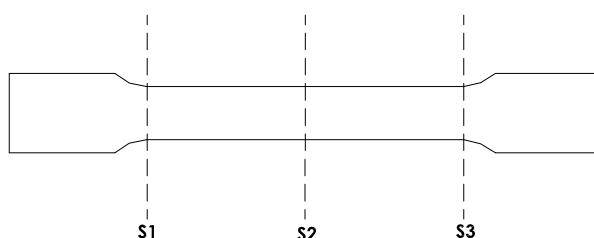


Figura4-4: Representação das secções transversais onde se efetuam as medições.

Tabela 4-3: Dimensões das três secções transversais referentes à zona útil.

Provete	Secção S1 (mm)		Secção S2 (mm)		Secção S3 (mm)		Comprimento da zona útil antes da realização do ensaio $L$ (mm)
	Largura	Espessura	Largura	Espessura	Largura	Espessura	
Provete 3	20.00	1.57	19.85	1.52	20.00	1.52	120
Provete 4	20.30	1.61	20.15	1.53	20.13	1.65	120
Provete 5	19.98	1.50	19.93	1.53	19.95	1.50	120
Provete 6	20.04	1.57	19.98	1.55	20.07	1.55	120
Provete 7	19.96	1.55	20.08	1.50	20.04	1.54	120
Provete 8	19.98	1.53	19.92	1.53	20.01	1.54	120
Provete 9	20.02	1.50	20.07	1.55	20.06	1.53	120
Provete 10	20.05	1.57	19.96	1.56	20.02	1.55	120
Provete 11	20.24	1.55	20.18	1.56	20.21	1.55	120
Provete 12	19.95	1.55	19.96	1.58	20.01	1.56	120

Após a conclusão dos ensaios de todos os provetes, verificou-se existirem roturas que se encontram fora da zona útil nos provetes 3, 7, 8 e 10, como se pode observar na Figura 4-5.

Na Tabela 4-4 encontram-se representados os valores da tensão de cedência, tensão última e extensão pós-rotura para os provetes em que a rotura se dá na zona útil. Nos



restantes provetes, estes parâmetros não são calculados. A área média de cada provete é obtida a partir das dimensões medidas nas três secções transversais ilustradas na Tabela 4-3. Para a medição dos comprimentos da zona útil após o ensaio utilizou-se novamente um paquímetro digital. A extensão pós-rotura é dada pela equação (4-1).

$$\varepsilon = \frac{L_f - L}{L} \quad (4-1)$$

Tabela 4-4: Resultados dos ensaios de tração.

Provete	Área média (mm <sup>2</sup> )	Comprimento da zona útil após a realização do ensaio, $L_f$ (mm)	Tensão de cedência, $f_y$ (MPa)	Tensão última, $f_u$ (MPa)	Extensão pós-rotura $\varepsilon$
Provete 4	32.24	135.47	409.67	478.97	0.13
Provete 5	30.13	136.95	350.31	408.37	0.14
Provete 6	31.18	140.73	409.95	481.61	0.17
Provete 9	30.61	147.20	351.70	409.01	0.23
Provete 11	31.39	133.78	424.80	492.04	0.11
Provete 12	31.22	146.04	336.25	399.02	0.22
Média		140.03	380.45	444.84	0.17
Desvio Padrão		5.61	38.42	43.49	0.08

De acordo com os resultados obtidos, e por comparação com os valores tabelados para o aço do tipo S280GD indicados na Tabela 3.1b da EN 1993-1-3, pode-se concluir que os provetes ensaiados ultrapassam a capacidade resistente nominal.



Figura 4-5: Aspeto dos provetes após ensaiados.

### 4.3 Identificação dos ensaios realizados nesta campanha experimental

Os vários tipos de ensaio realizados neste trabalho são identificados na Tabela 4-5. Como se pode constatar foram realizados ensaios à flexão com os perfis orientados segundo o eixo de maior inércia (designado como eixo  $y$ ) e também com o eixo de menor inércia (designado como eixo  $z$ ). Neste último caso, realizaram-se ensaios com o banzo maior à tração (designado como eixo  $z1$ ) e à compressão (designado como eixo  $z2$ ), nos perfis EMC 90×1.5 e EMC 150×1.5.

Com esta campanha experimental, pretende-se compreender e avaliar o comportamento estrutural à flexão dos perfis em estudo e perceber qual a influência da furação existente ao longo da alma nesse mesmo comportamento. Para tal, são efetuados ensaios em perfis de alma cheia (sem aberturas) e em perfis com aberturas e bordo reentrante ao longo da abertura. São estudados três tipos de ensaio em perfis com e sem aberturas, conduzindo a um total de 12 ensaios tipo.

Tabela 4-5: Designação da campanha de ensaios experimentais.

Tipo de perfil	Ensaio de flexão em $yy$	Ensaio de flexão em $zz$ com banzo maior à tração	Ensaio de flexão em $zz$ com banzo maior à compressão
EMC 90×1.5 sem aberturas	90×1.5_Liso_Fyy	90×1.5_Liso_Fz1	90×1.5_Liso_Fz2
EMC 90×1.5 com aberturas e bordo reentrante ao longo da abertura	90×1.5_Furos_Fyy	90×1.5_Furos_Fz1	90×1.5_Furos_Fz2
EMC 150×1.5 sem aberturas	150×1.5_Liso_Fyy	150×1.5_Liso_Fz1	150×1.5_Liso_Fz2
EMC 150×1.5 com aberturas e bordo reentrante ao longo da abertura	150×1.5_Furos_Fyy	150×1.5_Furos_Fz1	150×1.5_Furos_Fz2

De seguida, apresentam-se esquemas representativos das dimensões dos provetes adotados para os ensaios experimentais.

-90×1.5\_Fyy\_Furos: perfil com 90 mm de altura e 1.5 mm de espessura, com aberturas na alma e bordo reentrante ao longo das aberturas; submetido a flexão simples segundo o eixo de maior inércia; carregamento aplicado no centro de corte da secção transversal.

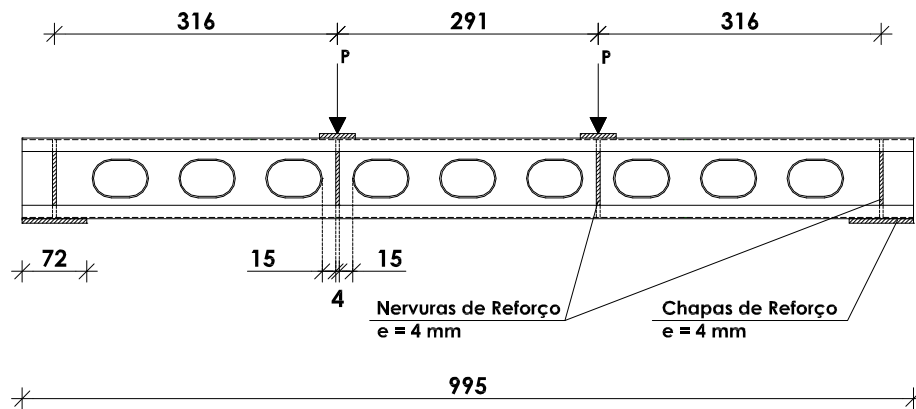
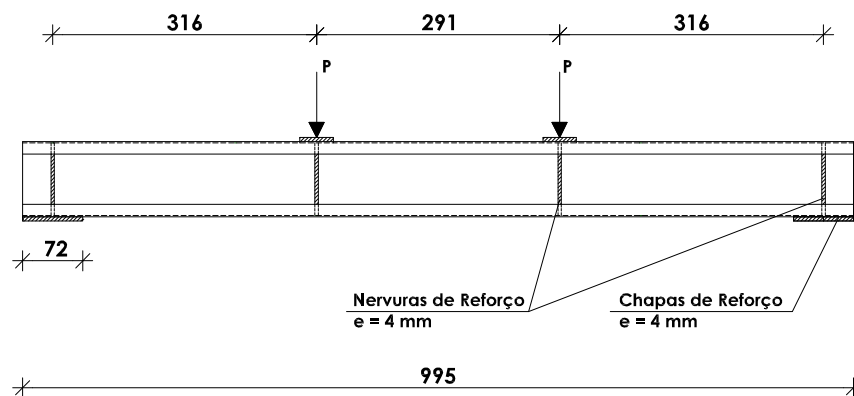


Figura 4-6: Alçado do ensaio tipo 90×1.5\_Fyy\_Furos (dimensões em mm).

-90×1.5\_Fyy\_Liso: perfil com 90 mm de altura e 1.5 mm de espessura, sem aberturas na alma; submetido a flexão simples segundo o eixo de maior inércia; carregamento aplicado no centro de corte da secção transversal.



a)



b)

Figura 4-7: Alçado do ensaio tipo 90×1.5\_Fyy\_Liso (dimensões em mm):a) esquema representativo e b) modelo experimental.

-90×1.5\_Fz1\_Furos: perfil com 90 mm de altura e 1.5 mm de espessura, com aberturas na alma e bordo reentrante ao longo das aberturas; submetido a flexão simples segundo o eixo de menor inércia; banzo maior tracionado.

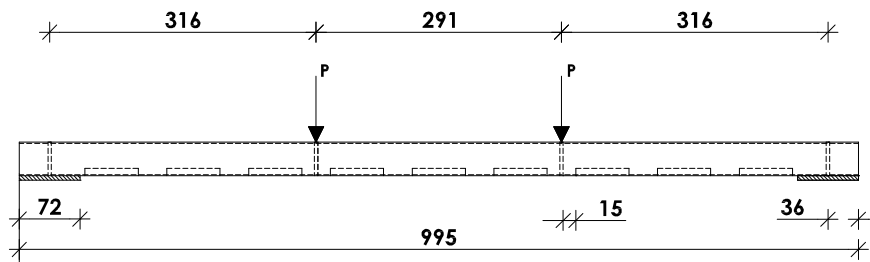


Figura 4-8: Alçado do ensaio tipo 90×1.5\_Fz1\_Furos (dimensões em mm).

-90×1.5\_Fz1\_Liso: perfil com 90 mm de altura e 1.5 mm de espessura, sem aberturas na alma; submetido a flexão simples segundo o eixo de menor inércia; banzo maior tracionado.

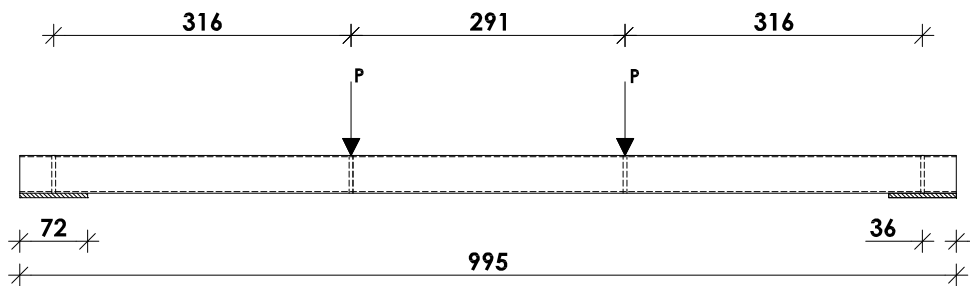
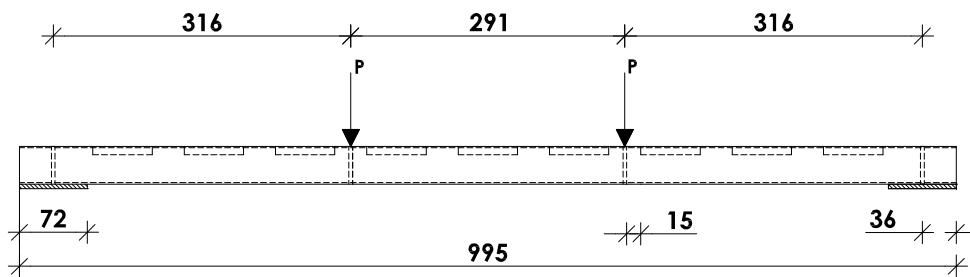


Figura 4-9: Alçado do ensaio tipo 90×1.5\_Fz1\_Liso (dimensões em mm).

-90×1.5\_Fz2\_Furos: perfil com 90 mm de altura e 1.5 mm de espessura, com aberturas na alma e bordo reentrante ao longo das aberturas; submetido a flexão simples segundo o eixo de menor inércia; banzo maior comprimido.



a)



b)

Figura 4-10: Alçado do ensaio tipo 90×1.5\_Fz2\_Furos (dimensões em mm): a) esquema representativo e b) modelo experimental.

-90×1.5\_Fz2\_Liso: perfil com 90 mm de altura e 1.5 mm de espessura, sem aberturas na alma; submetido a flexão simples segundo o eixo de menor inércia; banzo maior comprimido.

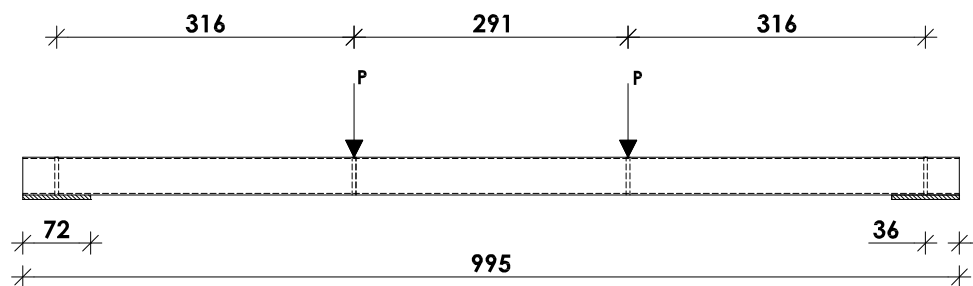


Figura 4-11: Alçado do ensaio tipo 90×1.5\_Fz2\_Liso (dimensões em mm).

-150×1.5\_Fyy\_Furos: perfil com 150 mm de altura e 1.5 mm de espessura, com aberturas na alma e bordo reentrante ao longo das aberturas; submetido a flexão simples segundo o eixo de maior inércia; carregamento aplicado no centro de corte da secção transversal.

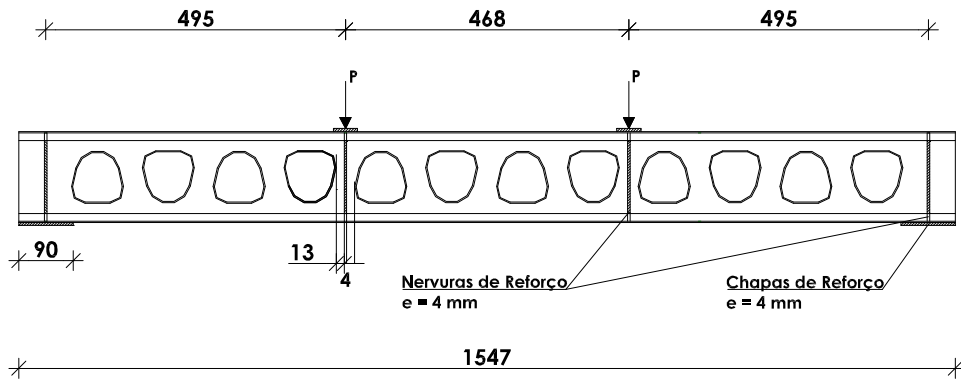


Figura 4-12: Alçado do ensaio tipo 150×1.5\_Fyy\_Furos (dimensões em mm).

-150×1.5\_Fyy\_Liso: perfil com 150 mm de altura e 1.5 mm de espessura, sem aberturas na alma; submetido a flexão simples segundo o eixo de maior inércia; carregamento aplicado no centro de corte da secção transversal.

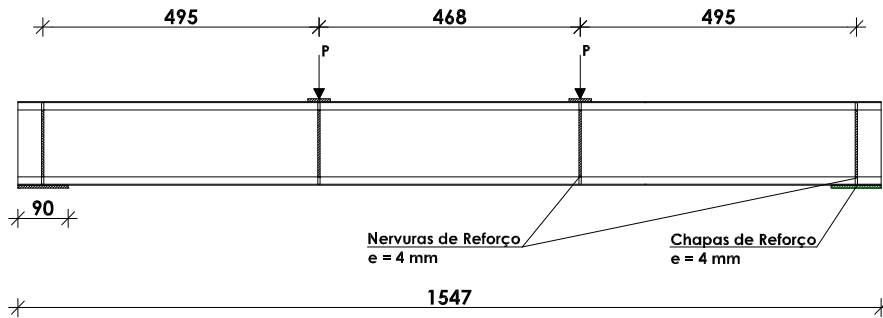
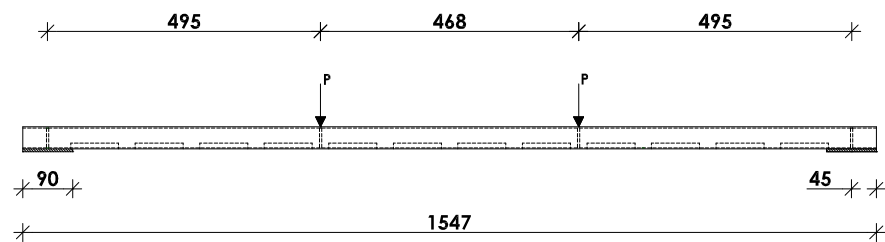


Figura 4-13: Alçado do ensaio tipo 150×1.5\_Fyy\_Liso (dimensões em mm).

-150×1.5\_Fzl\_Furos: perfil com 150 mm de altura e 1.5 mm de espessura, com aberturas na alma e bordo reentrante ao longo das aberturas; submetido a flexão simples segundo o eixo de menor inércia; banzo maior tracionado.



a)



b)

Figura 4-14: Alçado do ensaio tipo 150×1.5\_Fz1\_Furos (dimensões em mm): a) esquema representativo e b) modelo experimental.

-150×1.5\_Fz1\_Liso: perfil com 150 mm de altura e 1.5 mm de espessura, sem aberturas na alma; submetido a flexão simples segundo o eixo de menor inércia; banzo maior tracionado.

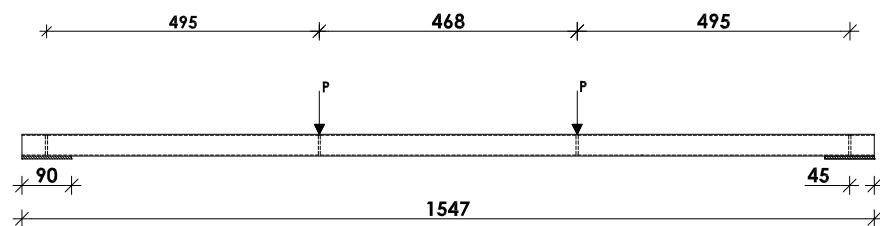


Figura 4-15: Alçado do ensaio tipo 150×1.5\_Fz1\_Liso (dimensões em mm).

-150×1.5\_Fz2\_Furos: perfil com 150 mm de altura e 1.5 mm de espessura, com aberturas na alma e bordo reentrante ao longo das aberturas; submetido a flexão simples segundo o eixo de menor inércia; banzo maior comprimido.

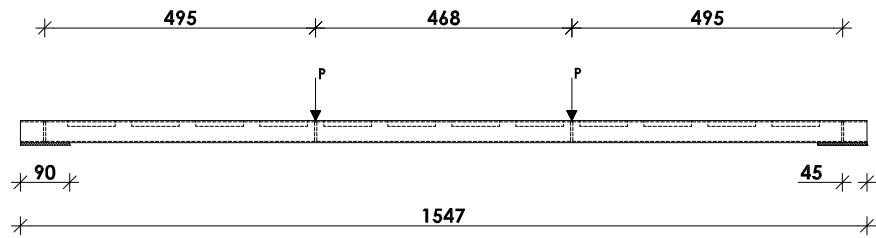


Figura 4-16: Alçado do ensaio tipo 150×1.5\_Fz2\_Furos (dimensões em mm).

-150×1.5\_Fz2\_Liso: perfil com 150 mm de altura e 1.5 mm de espessura, sem aberturas na alma; submetido a flexão simples segundo o eixo de menor inércia; banzo maior comprimido.

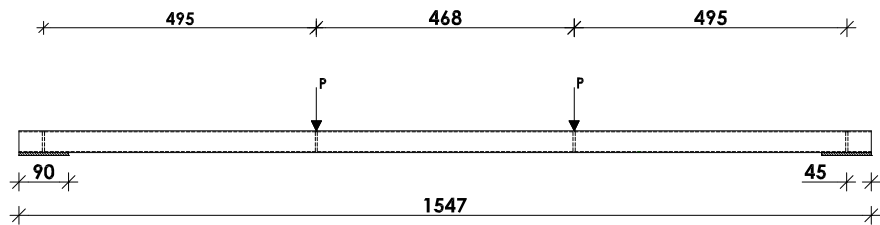


Figura 4-17: Alçado do ensaio tipo 150×1.5\_Fz2\_Liso (dimensões em mm).

Em todos os tipos de ensaio são colocadas chapas metálicas transversais posicionadas ao nível das cargas pontuais e dos apoios, com 4 mm de espessura (ver Figura 4-19). Utilizam-se também chapas de 4 mm de espessura sob os apoios (ver Figura 4-18). Com estas chapas metálicas pretende-se evitar fenómenos de instabilidade local, devido à distribuição de carga pontual existente nestes pontos.



Figura 4-18: Chapa metálica utilizada sob o apoio.



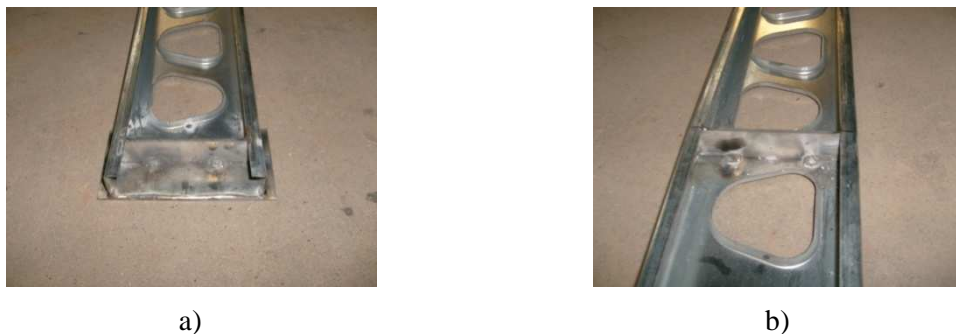


Figura 4-19: Chapas transversais: a) na zona dos apoios e b) sob as cargas pontuais.

#### 4.4 Metodologia e instrumentação da campanha experimental

De um modo geral, nesta campanha experimental foram ensaiados 3 provetes iguais para cada uma das 12 designações tipo definidas na Tabela 4-5. Inicialmente, procedeu-se à montagem do ensaio que inclui a colocação dos apoios e vigas de distribuição do carregamento e o posicionamento dos transdutores de deslocamento. Posteriormente, efetuou-se uma verificação do alinhamento do provete de forma a conferir uma simetria a nível transversal e longitudinal e assim minimizar excentricidades e esforços que possam alterar as condições de ensaio pretendidas. Também se efetuou uma calibração dos transdutores de deslocamento. Seguiu-se a aplicação de uma pré-carga e o respetivo carregamento do provete.

Nesta campanha experimental adotou-se um carregamento por controlo de deslocamento. Os ensaios consideraram-se como terminados quando se observa uma perda de resistência do perfil superior a 20% da carga máxima atingida, ou quando os deslocamentos são tão elevados que possam por em causa a segurança dos equipamentos utilizados. Por último, procedeu-se à desmontagem do esquema de ensaio e à análise e tratamento de resultados. Na Tabela 4-6 encontram-se as tarefas mais importantes na preparação dos ensaios e a respetiva sequência das mesmas.

Tabela 4-6: Sequencia das tarefas mais importantes na realização dos ensaios experimentais.

Ensaio com flexão em $yy$	Ensaio com flexão em $z1$ e $z2$
1-Realização da abertura na posição do centro de corte, onde atuam as cargas pontuais.	1-Colocação do provete sob os apoios.
2-Fixação da viga de carregamento na posição do centro de corte, por intermédio de um varão roscado.	2-Colocação de meias canas e da viga de carregamento.
3-Colocação do provete sob os apoios, e posicionamento dos transdutores.	3-Posicionamento dos transdutores.
4-Verificação da simetria do provete e calibração dos transdutores de deslocamento.	4- Verificação da simetria do provete e calibração dos transdutores de deslocamento.

Os equipamentos utilizados permitem impor as condições pretendidas dos ensaios. De seguida faz-se uma descrição dos equipamentos mais importantes utilizados nesta campanha experimental:

-*Estrutura de reação*: pórtico metálico onde se instala o elemento de teste e os demais equipamentos necessários para a realização do ensaio experimental. No caso presente, o pórtico utilizado é auto-equilibrado.

-*Atuador*: mecanismo acionado hidraulicamente que aplica os carregamentos de forma controlada. Na presente campanha experimental adotou-se o controlo de deslocamento. O controlo de deslocamento consiste na imposição de uma determinada velocidade de deslocamento ao atuador, que pode ser constante ou variável ao longo do ensaio. O atuador utilizado nesta campanha experimental apresenta uma capacidade de 150 kN, um curso de 200 mm e uma velocidade de deslocamento de 0.02 mm/s

- *Sistema de aquisição de dados*: na obtenção de deformações verticais e horizontais nos provetes foram utilizados transdutores de deslocamento, LVDTs. Estes encontram-se ligados ao Software Dynatester que permite o registo simultâneo dos deslocamentos e da força aplicada, ao longo do tempo de ensaio.

-*Vigas de distribuição*: As vigas de distribuição utilizadas apresentam uma secção transversal tubular. Estas vigas transferem a carga do atuador para o elemento de teste, possibilitando o carregamento do provete em duas zonas pontuais, tal como pretendido. Nos ensaios de flexão simples segundo o eixo de maior inércia, foram também efetuados uns furos ovalizados na parte superior e inferior da viga para permitirem a transmissão da carga de forma pontual e no centro de corte da secção transversal (ver Figura 4-20).



Figura 4-20: Posição dos furos ovalizados existentes na viga de carregamento.

#### **4.5 Preparação dos ensaios com solicitação segundo o eixo de maior inércia**

Pretende-se analisar experimentalmente o comportamento estrutural à flexão dos perfis em estudo quando solicitados segundo o seu eixo de maior inércia. Como se trata de uma secção monossimétrica, foi necessário quantificar a posição do centro de corte. A determinação do centro de corte permitirá aplicar o carregamento sem induzir torção no elemento, se o eixo de aplicação da solicitação contiver esse ponto.

Para a obtenção da posição do centro de corte recorreu-se ao Software Abaqus, que tem por base o Método de Elementos Finitos. Todas as decisões tomadas no Software Abaqus para a modelação destes perfis metálicos utilizados nesta campanha experimental, como a malha de elementos finitos e elemento tipo adotado serão abordadas de forma mais específica e pormenorizada no Capítulo 5, referente à modelação numérica. Neste capítulo, apenas se fará referência à estratégia adotada na obtenção da posição do centro de corte para as 4 designações tipo: 90×1.5\_Furos\_Fyy, 90×1.5\_Liso\_Fyy, 150×1.5\_Furos\_Fyy e 150×1.5\_Liso\_Fyy.

No presente caso, determinou-se a excentricidade,  $e$ , correspondente a posição do centro de corte, medida em relação à linha média da secção transversal com recurso a um processo iterativo que consiste em aplicar uma força pontual variando a sua posição até que o deslocamento horizontal do banzo inferior da secção transversal, no ponto  $B$  seja aproximadamente nulo (ver Figura 4-21). De salientar que para este estudo se utiliza uma análise linear material e geométrica com as seguintes propriedades: módulo de elasticidade de 210 GPa e um coeficiente de poisson de 0.3. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4-7.

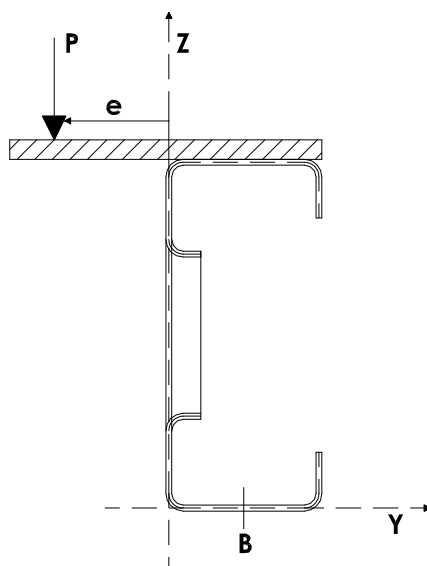


Figura 4-21: Excentricidade correspondente à posição do centro de corte, medida em relação à linha média da secção transversal.

Tabela 4-7: Valores obtidos para a posição do centro de corte.

Designação tipo	Excentricidade $e$ (mm)	Deslocamento horizontal em $B$ (mm)
90×1.5_Furos_Fyy	19.5	0.04
90×1.5_Liso_Fyy	19.5	0.12
150×1.5_Furos_Fyy	17.5	0.01
150×1.5_Liso_Fyy	16.75	0.06

Tendo em conta aos resultados obtidos para a posição do centro de corte e de acordo com o objetivo pretendido nesta campanha experimental, surge a necessidade de definir uma estratégia experimental que reproduza adequadamente esta análise.

A solução encontra-se identificada na Figura 4-22, na qual se utiliza um varão roscado que liga uma chapa saliente fixa ao perfil e à viga de distribuição. Entre esta chapa saliente e a viga de distribuição são colocados elementos intercalares para evitar o contacto das mesmas e assim transmitir a carga de forma pontual tal como pretendido. O diâmetro correspondente ao varão roscado para os ensaios do tipo 90×1.5\_Fyy\_Furos e 90×1.5\_Fyy\_Liso é de 4 mm, enquanto nos ensaios de 150×1.5\_Fyy\_Furos e de 150×1.5\_Fyy\_Liso é de 8 mm. A chapa saliente utilizada apresenta as dimensões em planta de 40×80 mm. De destacar que estas chapas salientes com o decorrer do ensaio não devem apresentar deformações excessivas para não alterarem as condições previstas, nomeadamente a transmissão da carga de forma pontual e sob o centro de corte.

Inicialmente, foram colocadas chapas com 4 mm de espessura, mas por observação do comportamento dos ensaios notou-se uma deformação considerável destas chapas o que obrigou a repensar a sua espessura sendo depois alterada para 14 mm (ver Tabela 4-8).



Figura 4-22: Pormenor da ligação utilizada para transmitir as cargas pontuais segundo a posição do centro de corte: a) vista frontal da ligação utilizada e b) posição do centro de corte na chapa saliente.

Tabela 4-8: Espessuras das chapas salientes.

Designação do ensaio experimental	Espessura da chapa saliente (mm)
90×1.5_Fyy_Furos_P1	4
90×1.5_Fyy_Furos_P2	4
90×1.5_Fyy_Furos_P3	4
90×1.5_Fyy_Furos_P4	14
90×1.5_Fyy_Liso_P1	4
90×1.5_Fyy_Liso_P2	4
90×1.5_Fyy_Liso_P3	14
90×1.5_Fyy_Liso_P4	14
150×1.5_Fyy_Furos_P2	14
150×1.5_Fyy_Furos_P3	14
150×1.5_Fyy_Furos_P4	14
150×1.5_Fyy_Furos_P5	14
150×1.5_Fyy_Furos_P6	14
150×1.5_Fyy_Furos_P7	14
150×1.5_Fyy_Liso_P1	14
150×1.5_Fyy_Liso_P2	14
150×1.5_Fyy_Liso_P3	14

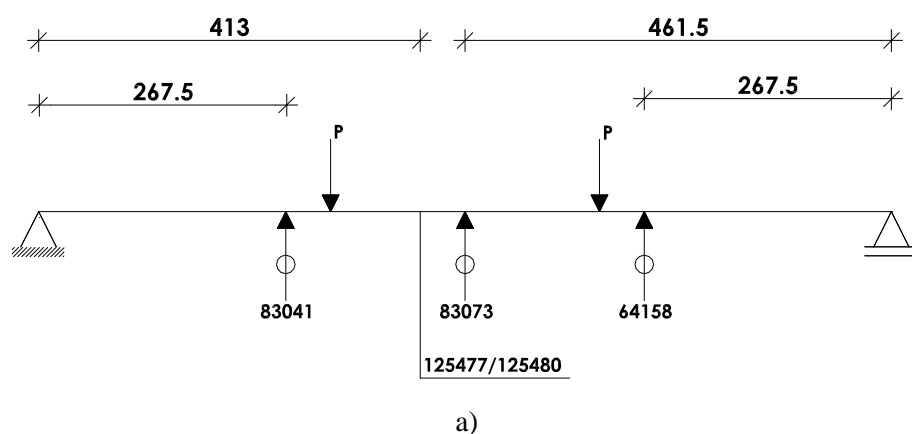
Para obter medidas de deformação que permitam identificar possíveis modos de instabilidade e recolher a variação da força com o deslocamento recorre-se à colocação de transdutores de deslocamento em pontos específicos. Colocam-se 3 transdutores para a

medição de deslocamentos verticais com o objetivo de caracterizar possíveis modos de instabilidade globais nomeadamente o modo de instabilidade global por flexão-torção e caracterizar a variação da força com os deslocamentos verticais observados. Colocam-se também 2 transdutores para a medição de deslocamentos horizontais que permitem identificar possíveis modos de instabilidade global por flexão e por flexão-torção.

A identificação de medidas de deformação correspondentes a modos de instabilidade locais é mais complexa, porque, estes modos envolvem deformações das paredes da barra, permanecendo o seu eixo na configuração indeformada. Desta forma os transdutores colocados não têm como objetivo identificar medidas de deformação para possíveis modos de instabilidade locais.

As posições correspondentes aos transdutores para a medição de deslocamentos verticais encontram-se representadas na Figura 4-23 e a posição correspondente aos transdutores para a medição de deslocamentos horizontais na Figura 4-24. Entre os transdutores para a medição de deslocamentos horizontais e o provete foram fixas chapas metálicas de reduzida espessura para aumentarem o campo de medição dos deslocamentos (ver Figura 4-24).

Os transdutores 83041 e 64158 apresentam um curso de  $\pm 5$  mm e o transdutor 83073 apresenta um curso de  $\pm 10$  mm.



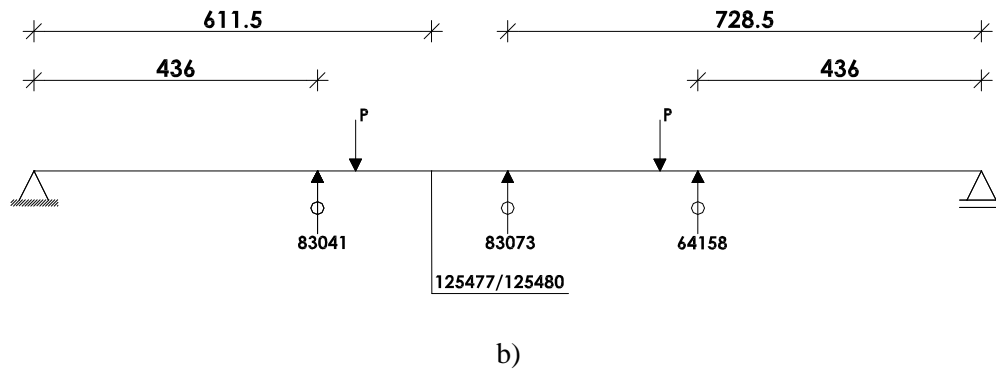


Figura 4-23: Posição dos transdutores de deslocamento verticais: a) perfis EMC 90×1.5 e b) perfis EMC 150×1.5.

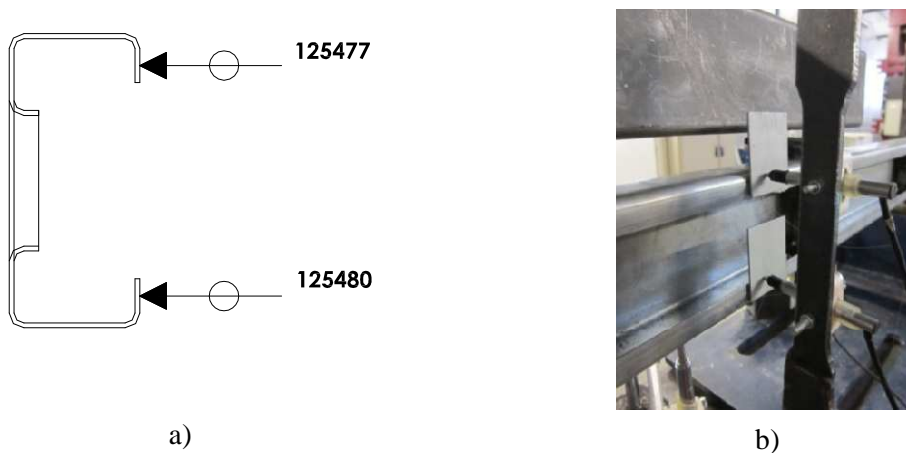


Figura 4-24: Transdutores para a medição dos deslocamentos horizontais: a) posição dos transdutores e b) chapas fixas ao provete para a medição dos deslocamentos horizontais.

#### 4.6 Preparação dos ensaios com solicitação segundo o eixo de menor inércia

Nestes casos não foi necessário quantificar a posição do centro de corte, por se tratar de uma secção monossimétrica com solicitação segundo o eixo de menor inércia, na qual há coincidência entre o centro de corte e o centro de massa.

Para a quantificação de medidas de deformação verticais foram colocados novamente três transdutores. Apesar de não se prever o modo de instabilidade global por flexão-torção, colocou-se um transdutor horizontal ao nível da alma. Volta-se a destacar que a colocação destes transdutores não têm como objetivo identificar medidas de deformação para possíveis modos de instabilidade locais.

As posições correspondentes aos transdutores de deslocamento verticais encontram-se representadas na Figura 4-25 e a posição dos transdutores de deslocamentos horizontais na Figura 4-26. Utilizam-se novamente chapas de reduzida espessura fixas ao provete para aumentarem o campo de medição dos deslocamentos horizontais (ver Figura 4-27). Os transdutores 63796 e 83140 apresentam um curso de  $\pm 12.5$  mm e o transdutor 83073 apresenta um curso de  $\pm 10$  mm.

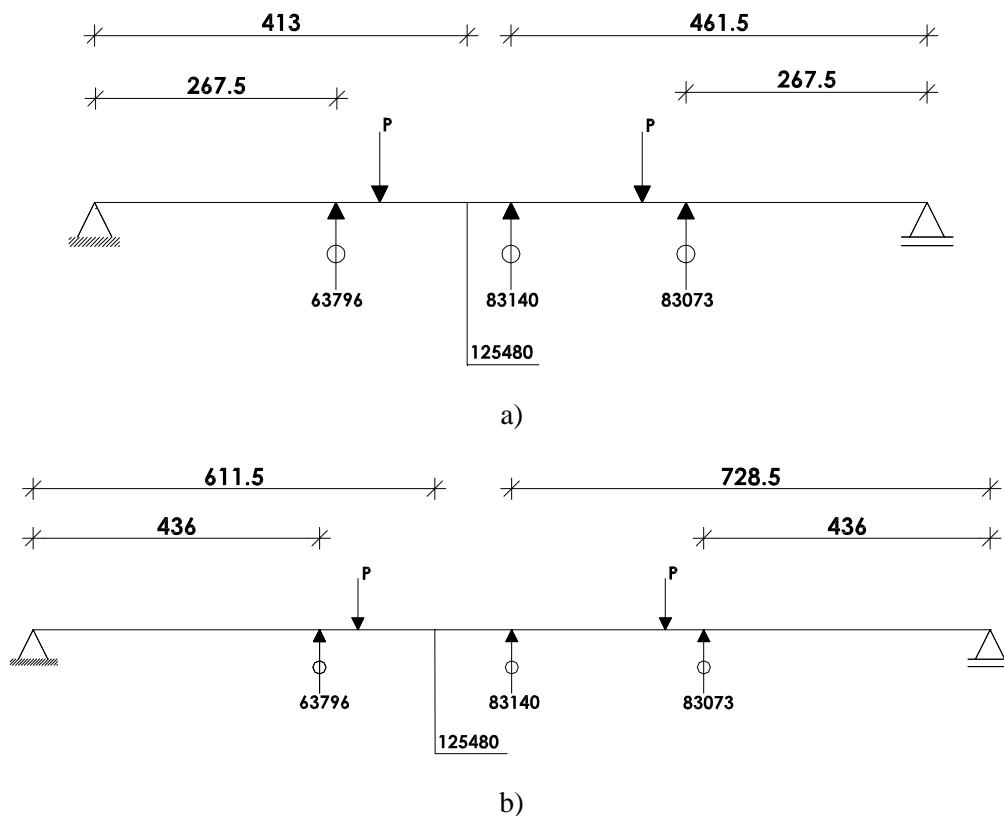


Figura 4-25: Posição dos transdutores de deslocamento verticais: a) perfis EMC 90x1.5 e b) perfis EMC 150x1.5

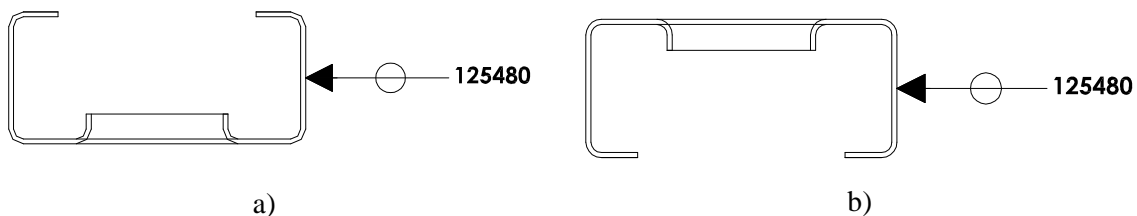


Figura 4-26: Posição dos transdutores de deslocamento horizontais: a) flexão segundo z1 e b) flexão segundo z2.





Figura 4-27: Chapas fixas ao provete para a medição dos deslocamentos horizontais.






#### 4.7 Resultados dos ensaios experimentais






O comportamento dos perfis enformados a frio caracteriza-se pela ocorrência de instabilidades locais e globais que se devem à sua elevada esbelteza e à baixa rigidez à torção. Neste tópico expõem-se, para cada ensaio, os modos de instabilidade observados nos ensaios experimentais realizados e as zonas condicionantes desse comportamento.


Na Tabela 4-9, apresentam-se as zonas condicionantes e os modos de instabilidade correspondentes aos ensaios com solicitação segundo o eixo de maior inércia,  $yy$ , com carregamento no centro de corte da secção transversal. Na Tabela 4-10 e na Tabela 4-11 mostram-se as zonas condicionantes e os modos de instabilidade correspondentes aos ensaios com solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração e à compressão,  $z1$  e  $z2$  respetivamente.

De um modo geral, foram realizados 3 ensaios para cada designação tipo. Em alguns casos foi necessário ensaiar um número de provetes superior, devido a falhas que ocorreram nos ensaios. Nestes casos, os ensaios não são contabilizados na análise de resultados.

Tabela 4-9: Zonas condicionantes e modos de instabilidade para os ensaios com solicitação segundo o eixo de maior inércia, yy.






Designação	Modos de instabilidade	Figura correspondente à localização da zona condicionante	Zona Condicionante
90x1.5_Fyy_Furos_P1	GFT+LP		Junto a uma das cargas pontuais.
90x1.5_Fyy_Furos_P2	GFT + (**)		Junto a uma das cargas pontuais.
90x1.5_Fyy_Furos_P3	GFT+(**)		Junto a uma das cargas pontuais.
90x1.5_Fyy_Furos_P4	GFT+LP+D		Zona de momento máximo, entre as cargas pontuais.
90x1.5_Fyy_Liso_P1	GFT+(**)		Junto a uma das cargas pontuais.







90×1.5_Fyy_Liso_P2	GFT+ (**)		Junto a uma das cargas pontuais.
90×1.5_Fyy_Liso_P3	GFT+LP+D		Zona de momento máximo, entre as cargas pontuais.
90×1.5_Fyy_Liso_P4			Falha no ensaio.
150×1.5_Fyy_Furos_P1			Falha no ensaio.
150×1.5_Fyy_Furos_P2	GFT+LP+D		Junto dos pontos de aplicação das cargas.
150×1.5_Fyy_Furos_P3			Falha do ensaio.
150×1.5_Fyy_Furos_P4	GFT+LP		Junto a uma das cargas pontuais.
150×1.5_Fyy_Furos_P5			Falha no ensaio.
150×1.5_Fyy_Furos_P6	GFT+LP		Junto a uma das cargas pontuais.

150x1.5_Fyy_Furos_P7	GFT+LP		Junto a uma das cargas pontuais.
150x1.5_Fyy_Liso_P1	GFT+LP		Junto a uma das cargas pontuais.
150x1.5_Fyy_Liso_P2	GFT+LP+D		Junto dos pontos de aplicação das cargas.
150x1.5_Fyy_Liso_P3	GFT+(**)		Junto a uma das cargas pontuais.

Nota: (\*\*) - dúvidas com a interpretação dos modos de instabilidade locais; GF - modo de instabilidade global por flexão; GFT - modo de instabilidade global por flexão-torção; LP - modo de instabilidade local de placa; D - modo de instabilidade distorcional.

Tabela 4-10: Zonas condicionantes e modos de instabilidade para os ensaios de solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração,  $zI$ .

Designação	Modos de instabilidade	Figura correspondente à localização da zona condicionante	Zona Condicionante
90x1.5_Fz1_Furos_P1	LP+D		Zona de momento máximo. Formação de vincos junto dos pontos de aplicação da carga e ao nível dos bordos de reforço. Almas na zona entre cargas com deslocamentos para o interior.
90x1.5_Fz1_Furos_P2	LP+D		Zona de momento máximo. Formação de vincos junto dos pontos de aplicação da carga e ao nível dos bordos de reforço. Almas na zona entre cargas com deslocamentos para o interior.
90x1.5_Fz1_Furos_P3	LP+D		Zona de momento máximo. Formação de vincos junto dos pontos de aplicação da carga e ao nível dos bordos de reforço. Almas na zona entre cargas com deslocamentos para o interior.
90x1.5_Fz1_Liso_P1	LP+ D		Zona de momento máximo. Formação de vincos junto de uma das cargas pontuais e ao nível dos bordos de reforço.
90x1.5_Fz1_Liso_P2	LP+D		Zona de momento máximo. Formação de vincos junto dos pontos de aplicação da carga e ao nível dos bordos de reforço. Almas na zona entre cargas com deslocamentos para o interior.





90x1.5_Fz1_Liso_P3	LP+D		<p>Zona de momento máximo.</p> <p>Formação de vincos junto dos pontos de aplicação da carga e ao nível dos bordos de reforço.</p> <p>Almas na zona entre cargas com deslocamentos para o interior.</p>
150x1.5_Fz1_Furos_P1	LP+D		<p>Zona de momento máximo.</p> <p>Formação de vincos entre os pontos de aplicação das cargas pontuais e ao nível dos bordos de reforço.</p>
150x1.5_Fz1_Furos_P2	LP+D		<p>Zona de momento máximo.</p> <p>Formação de vincos entre os pontos de aplicação das cargas pontuais e ao nível dos bordos de reforço.</p>
150x1.5_Fz1_Furos_P3	LP+D		<p>Zona de momento máximo.</p> <p>Formação de vincos entre os pontos de aplicação das cargas pontuais e ao nível dos bordos de reforço.</p>
150x1.5_Fz1_Liso_P1	LP+D		<p>Zona de momento máximo.</p> <p>Formação de vincos entre os pontos de aplicação das cargas pontuais e ao nível dos bordos de reforço.</p>
150x1.5_Fz1_Liso_P2	LP+D		<p>Zona de momento máximo.</p> <p>Formação de vincos entre os pontos de aplicação das cargas pontuais e ao nível dos bordos de reforço.</p>








150x1.5_Fz1_Liso_P3	LP+D		<p>Zona de momento máximo.</p> <p>Formação de vencos entre os pontos de aplicação das cargas pontuais e ao nível dos bordos de reforço.</p>
---------------------	------	--	---




Nota: LP- modo de instabilidade local de placa; D- modo de instabilidade distorcional.

Tabela 4-11: Zonas condicionantes e modos de instabilidade para os ensaios de solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão, z2.

Designação	Modos de instabilidade	Figura correspondente à localização da zona condicionante	Zona Condicionante
90x1.5_Fz2_Furos_P1	LP		Aproximadamente a meio vão, sobre a abertura.
90x1.5_Fz2_Furos_P2	LP		Aproximadamente a meio vão, sobre a abertura.
90x1.5_Fz2_Furos_P3	LP		Aproximadamente a meio vão, sobre a abertura.
90x1.5_Fz2_Liso_P1	LP		Zona de momento máximo entre a secção de meio vão e um dos pontos de aplicação da carga.

90×1.5_Fz2_Liso_P2	LP		Aproximadamente a meio vão.
90×1.5_Fz2_Liso_P3	LP		Aproximadamente a meio vão.
150×1.5_Fz2_Furos_P1			Falha no ensaio
150×1.5_Fz2_Furos_P2	LP		Aproximadamente a meio vão, sobre a abertura.
150×1.5_Fz2_Furos_P3	LP		Aproximadamente a meio vão, sobre a abertura.
150×1.5_Fz2_Furos_P4	LP		Aproximadamente a meio vão, sobre a abertura.



150×1.5_Fz2_Liso_P1	LP		Aproximadamente a meio vão.
150×1.5_Fz2_Liso_P2	LP		Aproximadamente a meio vão.
150×1.5_Fz2_Liso_P3	LP		Aproximadamente a meio vão.

Nota: LP- modo de instabilidade local de placa.

De seguida, apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão. Apresentam-se também tabelas com a carga máxima registada em cada provete e as deformações correspondentes a essa carga máxima para os três transdutores que medem a deformação vertical dos provetes. É de salientar que se considerou o valor de pré-carga e a massa da viga de distribuição nas cargas máximas obtidas em todos os provetes.

Na apresentação dos resultados, faz-se uma separação de acordo com o tipo de solicitação: solicitação segundo o eixo de maior inércia,  $yy$ ; solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração,  $z1$  e solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão,  $z2$ .

Nos ensaios com solicitação segundo o eixo de maior inércia,  $yy$ , apresentam-se também curvas que relacionam a força aplicada com a deformação para os transdutores de medição dos deslocamentos horizontais, pois é patente o modo de instabilidade global por flexão-torção.

Para os ensaios com solicitação segundo o eixo de menor inércia, com banzo maior à tração e à compressão, apenas se apresenta a curva que relaciona a força com a deformação horizontal, para o provete P1 da designação 90×1.5\_Fz1\_Furos, porque nestes ensaios não se observam modos de instabilidade global.

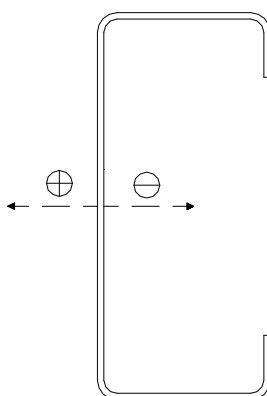


Figura 4-28: Representação esquemática, do sentido positivo e negativo para os deslocamentos horizontais.

#### 4.7.1 Ensaaios com solicitação segundo o eixo de maior inércia, $yy$

Na Figura 4-29, apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, obtidas pelo transdutor 83073 para os provetes do tipo 90×1.5\_Fyy\_Furos. Os provetes desta designação tipo apresentam uma chapa saliente de 4 mm, com exceção do provete P4 onde a mesma chapa apresenta uma espessura de 14 mm. A alteração da espessura, tal como já foi referido, deve-se à observação de uma deformação considerável destas chapas que pode por em causa as condições de aplicação das cargas pontuais inicialmente previstas.

Relativamente ao andamento das curvas, observa-se inicialmente um comportamento linear correspondente à fase elástica seguido de uma fase de plastificação. Observam-se zonas em patamar para os provetes P2, P3 e P4. No provete P1 esta zona de patamar não é tão evidente.

Verifica-se também pela análise da Figura 4-29 que as curvas apresentam uma perda de carga suave após ser atingida a carga máxima, à exceção do provete P1. O provete P4 atinge a carga máxima para uma deformação inferior à dos provetes P2 e P3, que por sua vez apresentam uma deformação correspondente à força máxima atuante relativamente próxima (consultar a Tabela 4-12). Tal facto talvez se deva à presença de diferentes espessuras nas chapas salientes sobre as quais atuam as cargas pontuais, o que conduziu à ocorrência de alguma torção nos provetes com chapa de 4 mm.

A alteração da espessura da chapa saliente no provete P4 conduziu a uma resistência máxima próxima dos restantes provetes mas com deformações inferiores. Esta alteração da espessura da chapa saliente também conduziu a uma zona de instabilidade condicionante diferente. Como se pode observar na Tabela 4-9, no provete P4, corresponde à zona de momento máximo entre as cargas pontuais e nos provetes P1, P2 e P3 corresponde à zona junto de uma das cargas pontuais.

A força máxima como se pode observar na Tabela 4-12 apresenta um desvio padrão de 0.82 kN e um coeficiente de variação igual a 4.43%, o que revela a uniformidade dos valores obtidos.

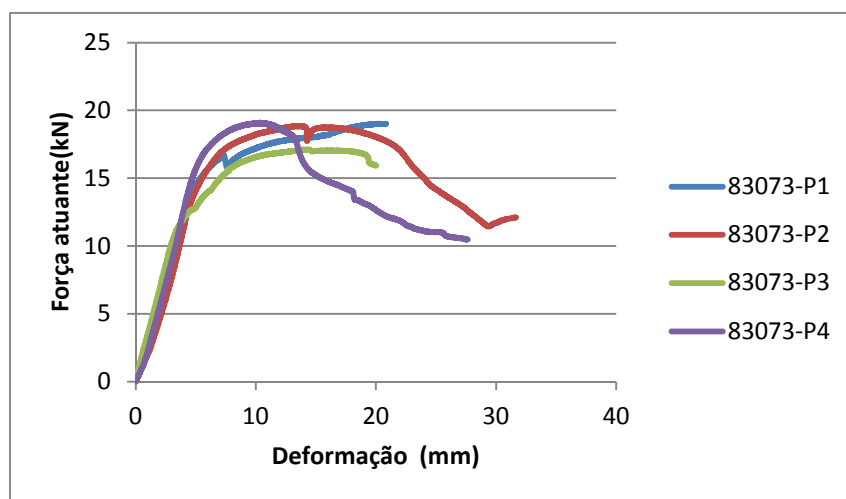


Figura 4-29: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão, para os provetes do tipo 90×1.5\_Fyy\_Furos.

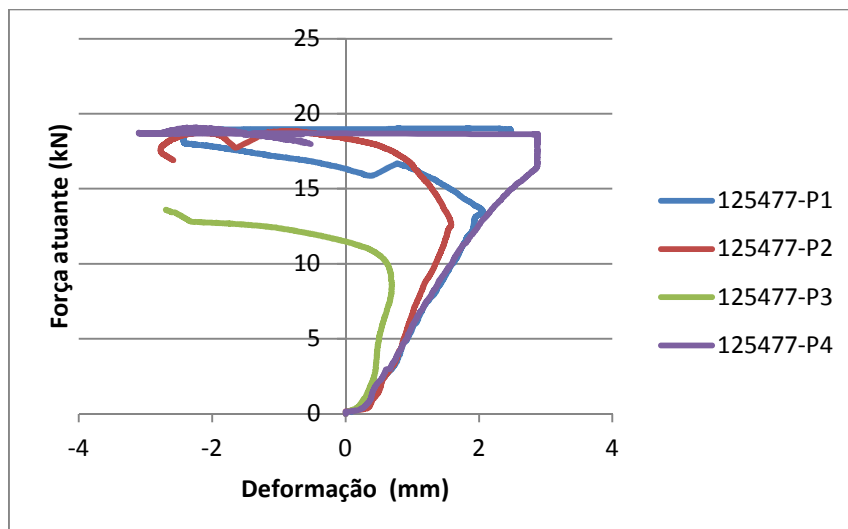
Tabela 4-12: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 90x1.5\_Fyy\_Furos.

Designação	Força máxima (kN)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83073 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83041 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 64158 (mm)
90x1.5_Fyy_Furos_P1	19.04	*	*	*
90x1.5_Fyy_Furos_P2	18.86	13.39	9.94	*
90x1.5_Fyy_Furos_P3	17.12	14.05	*	*
90x1.5_Fyy_Furos_P4	19.11	10.35	7.93	8.97
Média	18.53			
Desvio padrão	0.82			
Coeficiente de variação	4.43%			

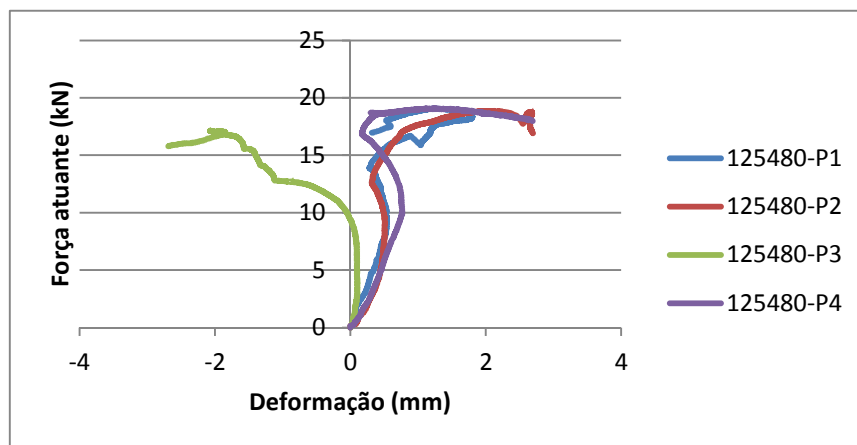
\* -não foi possível efetuar a medição

Na Figura 4-30 apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação horizontal medida. Como se pode observar, os provetes P1, P2 e P4 apresentam um comportamento semelhante, em que, os dois transdutores apresentam inicialmente deformações positivas e numa fase final, próxima da carga máxima, apresentam deformações opostas. Esta deformação observada nos transdutores mostra que inicialmente os provetes apresentam instabilidade global por flexão e numa fase final instabilidade global por flexão-torção.

O provete P3 apresenta um comportamento um pouco diferente dos restantes, com deformações maioritariamente negativas nos dois transdutores ao longo do ensaio. Este facto conduz a uma instabilidade global por flexão, no entanto e aquando da realização do ensaio também se observou algum movimento de torção.



a)



b)

Figura 4-30: Relação entre força e deformação horizontal nos provetes do tipo 90x1.5\_Fyy\_Furos: a) transdutor 125477 e b) transdutor 125480.

Na Figura 4-31, apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, obtidas pelo transdutor 83073 para os provetes do tipo 90x1.5\_Fyy\_Liso. A espessura das chapas salientes dos provetes P1 e P2 sobre as quais atuam as cargas pontuais são de 4 mm e do provete P3 de 14 mm.

Na Figura 4-31 verifica-se uma semelhança entre as curvas referentes aos provetes P1 e P2, enquanto o provete P3 apresenta um comportamento um pouco diferente, em que a deformação a meio vão, relativa à força máxima, é inferior à deformação sofrida pelos provetes P1 e P2 e apresenta uma queda mais acentuada da curva após a resistência máxima, quando comparado com os provetes P1 e P2.

Também se observa através na Tabela 4-13 que os deslocamentos correspondentes à força máxima para os transdutores 83041 e 64158, no provete P3, são inferiores aos deslocamentos medidos nos provetes P1 e P2.

O provete 90x1.5\_Fyy\_Liso-P3 também apresenta uma resistência máxima próxima dos restantes provetes do mesmo tipo, mas com deformação inferior. Verificam-se novamente diferenças na localização da zona condicionante (ver Tabela 4-9). A zona condicionante para os provetes P1 e P2 é junto de um dos pontos de aplicação das cargas pontuais e para o provete P3 é na zona de momento máximo, entre as cargas pontuais. Como se pode observar na Tabela 4-13, a força máxima apresenta um desvio padrão próximo de zero (0.03 kN) e um coeficiente de variação de 0.37%, revelando a uniformidade dos valores obtidos.

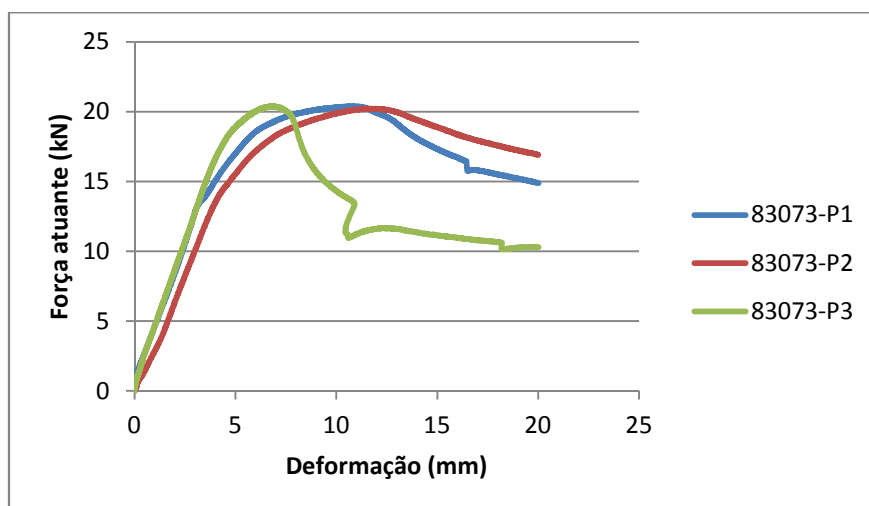
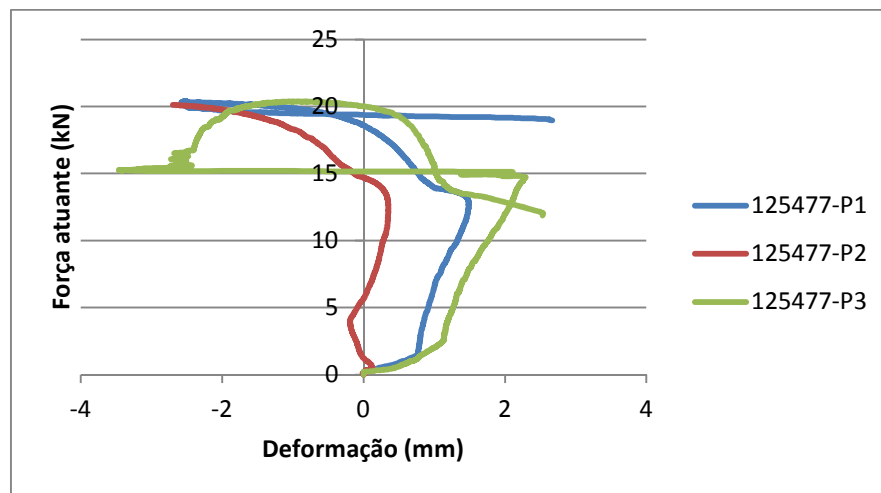


Figura 4-31: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão, para os provetes do tipo 90x1.5\_Fyy\_Liso.

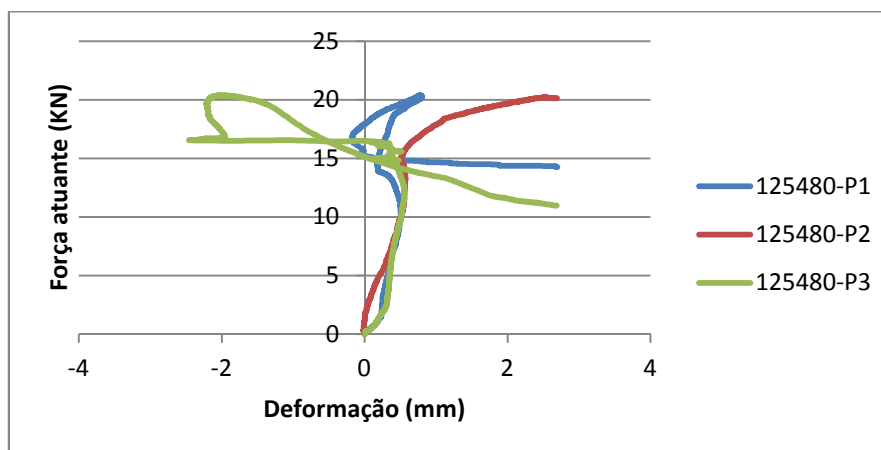
Tabela 4-13: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 90x1.5\_Fyy\_Liso.

Designação	Força máxima (kN)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83073 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83041 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 64158 (mm)
90x1.5_Fyy_Liso_P1	20.34	10.85	8.56	8.72
90x1.5_Fyy_Liso_P2	20.21	11.53	8.65	9.22
90x1.5_Fyy_Liso_P3	20.34	6.70	4.80	5.77
Média	20.30			
Desvio padrão	0.03			
Coeficiente de variação	0.37%			

Na Figura 4-32 apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação horizontal para os provetes do tipo 90×1.5\_Fyy\_Liso. Constata-se deformações positivas nos dois transdutores e em todos os provetes até uma carga de aproximadamente 15 kN. Após a carga de 15 kN, observa-se nas curvas um comportamento estranho que dificulta a identificação de tendências.



a)



b)

Figura 4-32: Relação entre força e deformação horizontal nos provetes do tipo 90×1.5\_Fyy\_Liso: a) transdutor 125477 e b) transdutor 125480.

Na Figura 4-34, apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, obtidas pelo transdutor 83073, nos provetes do tipo 150×1.5\_Fyy\_Furos. A curva correspondente ao provete P2, não se encontra representada devido a um problema com o transdutor colocado, que impossibilitou o registo da deformação.

Por observação da Figura 4-34 pode-se constatar que existe um comportamento semelhante das curvas nos três provetes identificados. No entanto, a curva referente ao provete P4 apresenta um decréscimo acentuado da força após a carga máxima ser atingida, para um nível de deformação de aproximadamente 16 mm. Tal facto deve-se a uma rotura da ligação numa das chapas transversais que se encontra sobre os apoios (ver Figura 4-33). O provete P6 também apresenta um decréscimo acentuado da força após a carga máxima, para um nível de deformação aproximadamente de 13 mm, o que se deve novamente a uma rotura da ligação, numa das chapas transversais que se encontra sobre os apoios (ver Figura 4-33).

O desvio padrão referente à carga máxima é igual a 0.19 kN e o coeficiente de variação é igual a 0.80% o que revela a uniformidade dos valores obtidos.



Figura 4-33: Pormenores referentes à rotura da ligação entre a chapa transversal sobre o apoio e o perfil: a) provete P4 e b) provete P6.

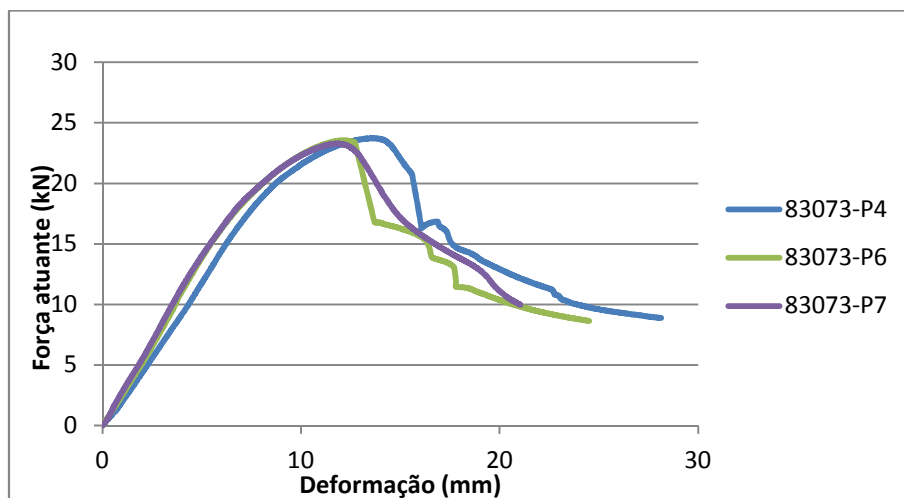


Figura 4-34: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão, para os provetes do tipo 150×1.5\_Fyy\_Furos.

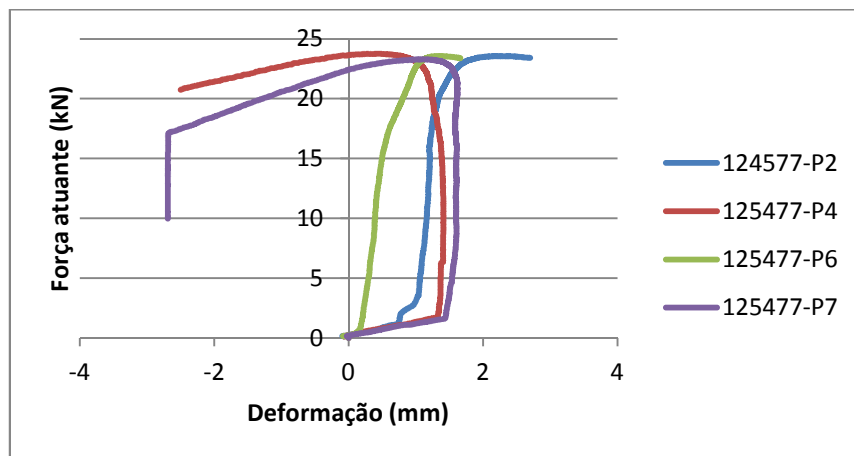


Tabela 4-14: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 150x1.5\_Fyy\_Furos.

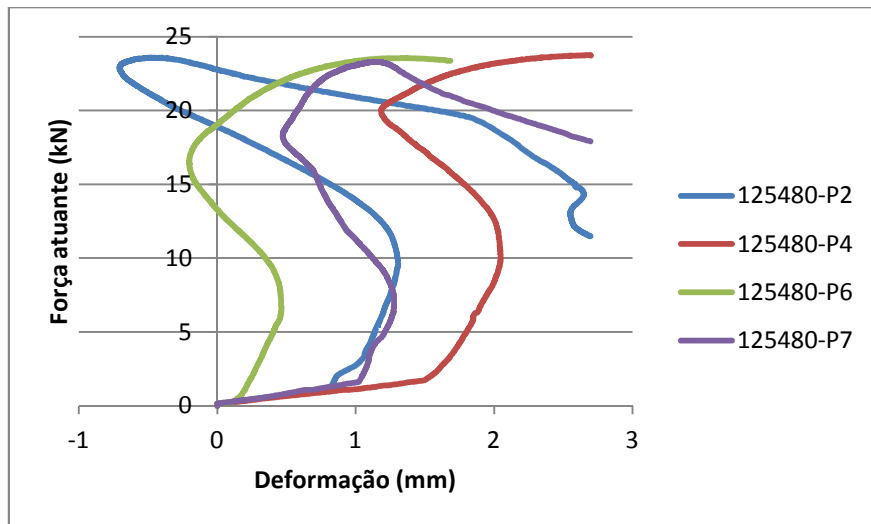
Designação	Força máxima (kN)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83073 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83041 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 64158 (mm)
150x1.5_Fyy_Furos_P2	23.57	**	12.36	10.97
150x1.5_Fyy_Furos_P4	23.75	13.49	10.97	10.73
150x1.5_Fyy_Furos_P6	23.57	12.13	9.27	10.14
150x1.5_Fyy_Furos_P7	23.30	11.87	11.01	9.29
Média	23.55			
Desvio padrão	0.19			
Coeficiente de variação	0.80%			

Nota: \*\* problema com o transdutor

Na Figura 4-35 apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação horizontal. Identificam-se duas tendências distintas no comportamento das curvas. Os provetes P2 e P6 apresentam na parte final das curvas deformações positivas nos dois transdutores enquanto os provetes P4 e P7 apresentam deformações opostas. Os provetes P4 e P7 exibem instabilidade global por flexão-torção e os provetes P2 e P6, apesar de indicarem instabilidade por flexão, também apresentam movimentos de torção, como se pode observar através na Figura 4-36.



a)



b)

Figura 4-35: Relação entre força e deformação horizontal nos provetes do tipo 150×1.5\_Fyy\_Furos: a) transdutor 125477 e b) transdutor 125480.



Figura 4-36: Pormenor relativo à torção observada no provete P2 do tipo 150×1.5\_Fyy\_Furos.

Na Figura 4-37 apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, obtidas com o transdutor 83073 para os provetes do tipo 150×1.5\_Fyy\_Liso. Verifica-se um andamento muito semelhante das curvas para os três provetes. Os valores de carga máxima ocorrem para valores de deformação próximos, como se pode constatar através da Tabela 4-15.

Relativamente às cargas máximas, destaca-se novamente a uniformidade dos valores obtidos, pelo facto de ter um desvio padrão próximo de zero (0.27 kN) e um coeficiente de variação de 1.11%.

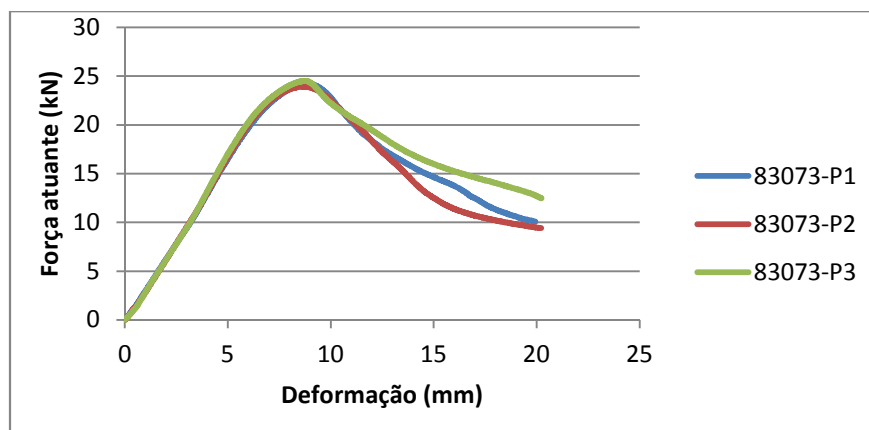
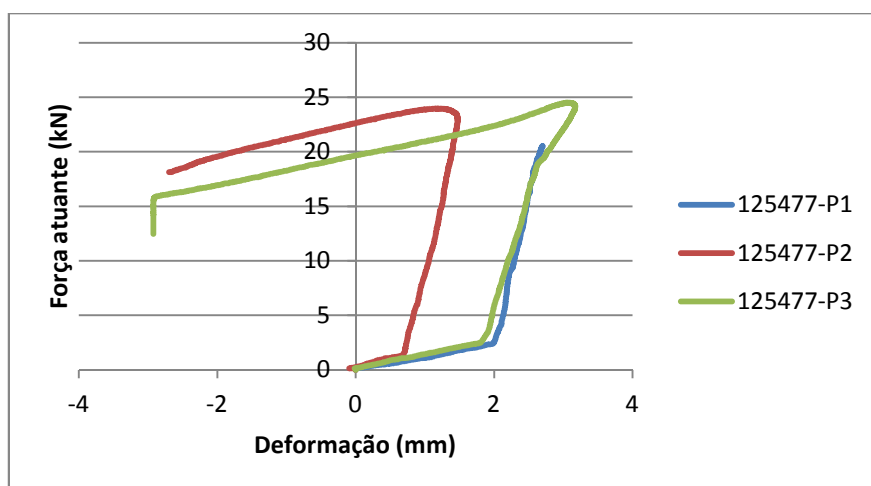


Figura 4-37: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão, para os provetes do tipo 150×1.5\_Fyy\_Liso.

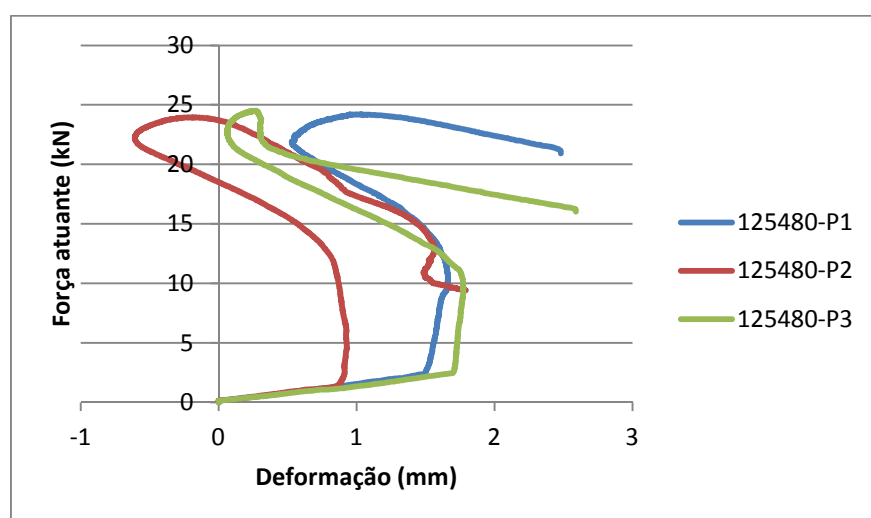
Tabela 4-15: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 150×1.5\_Fyy\_Liso.

Designação	Força máxima	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83073 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83041 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 64158 (mm)
150x1.5_Fyy_Liso_P1	24.33	8.91	6.63	7.30
150x1.5_Fyy_Liso_P2	23.96	8.67	7.17	6.81
150x1.5_Fyy_Liso_P3	24.5	8.76	7.32	6.94
Média	24.23			
Desvio padrão	0.27			
Coeficiente de variação	1.11%			

Na Figura 4-38 apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação horizontal nos provetes do tipo 150×1.5\_Fyy\_Liso. Na fase final das curvas, os provetes P2 e P3 apresentam deformações opostas, enquanto o provete P1 apresenta deformações positivas. Assim os provetes P2 e P3 exibem instabilidade global por flexão-torção e o provete P1 apesar de indiciar instabilidade global por flexão exibe também movimento de torção como se pode constatar através da Figura 4-39.



a)



b)

Figura 4-38: Relação entre força e deformação horizontal nos provetes do tipo 150×1.5\_Fyy\_Liso: a) transdutor 125477 e b) transdutor 125480.



Figura 4-39: Torção observada no provete P1 do tipo 150×1.5\_Fyy\_Liso.

#### 4.7.2 Ensaaios com solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração, z1

Na Figura 4-40, apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, obtidas pelo transdutor 83140 para os provetes do tipo 90×1.5\_Fz1\_Furos. Os vários provetes referentes aos ensaios deste tipo apresentam um comportamento muito semelhante, com as curvas de força-deslocamento praticamente coincidentes. Este comportamento semelhante também foi evidente quando se compara a localização das zonas condicionantes que se deram numa zona de momento máximo com a formação de vincos junto dos pontos de aplicação da carga e ao nível dos bordos de reforço (consultar Tabela 4-10).

Como se pode observar na Tabela 4-16 e na Figura 4-40, as cargas máximas dão-se para valores de deformação a meio vão relativamente próximos, apresentando um desvio padrão de 0.1 kN e um coeficiente de variação de 0.8% o que revela a uniformidade dos valores obtidos. De salientar também que as curvas referentes aos três provetes e tal como ilustrado Figura 4-40 apresentam uma perda de carga suave após a carga máxima.

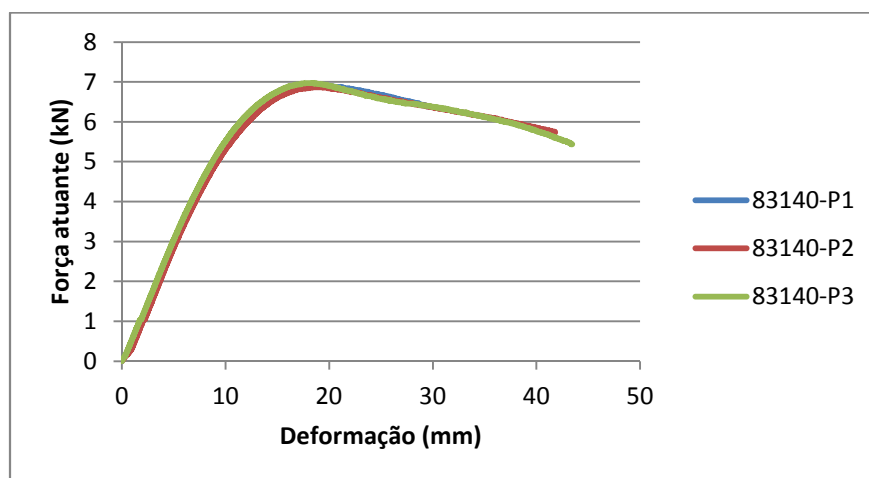


Figura 4-40: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão, para os provetes do tipo 90×1.5\_Fz1\_Furos.

Tabela 4-16: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 90x1.5\_Fz1\_Furos.

Designação	Força máxima (kN)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83140 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 63796 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83073 (mm)
90x1.5_Fz1_Furos_P1	6.91	19.32	*	14.82
90x1.5_Fz1_Furos_P2	6.86	18.15	13.59	14.02
90x1.5_Fz1_Furos_P3	6.97	17.68	13.34	13.85
Média	6.91			
Desvio padrão	0.1			
Coeficiente de variação	0.8%			

Nota: \* não foi possível efetuar a medição.

Na Figura 4-41 denota-se também um comportamento semelhante das curvas referentes aos deslocamentos horizontais, com deformações maioritariamente positivas. Este andamento das curvas não traduz a ocorrência de modos de instabilidade globais, mas sim resulta do facto destes provetes apresentarem deslocamentos para o interior na zona da alma (consultar Tabela 4-10) na qual se colocou o transdutor para a medição dos deslocamentos horizontais.

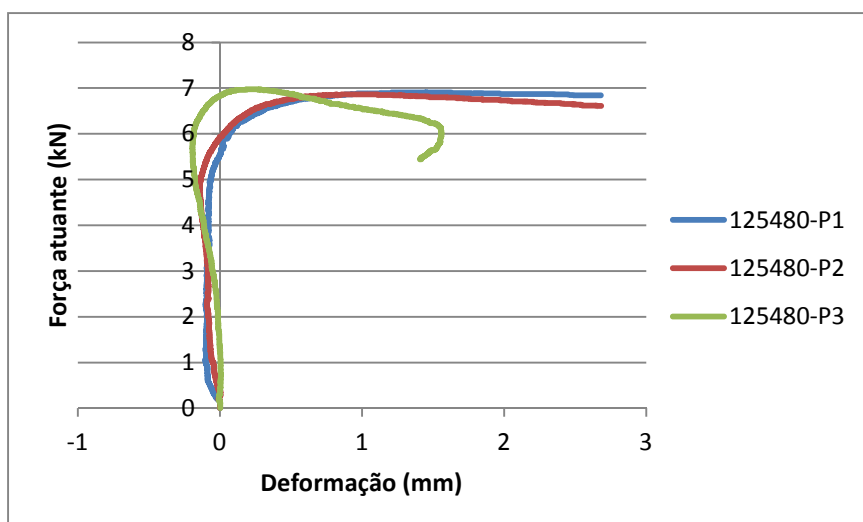


Figura 4-41: Relação entre força e deformação horizontal nos provetes do tipo 90x1.5\_Fz1\_Furos.

Na Figura 4-42 apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, obtidas pelo transdutor 83140 para os provetes do tipo

90x1.5\_Fz1\_Liso. Consta-se mais uma vez, tal como aconteceu nos ensaios do tipo de 90x1.5\_Fz1\_Furos, um comportamento semelhante com as curvas praticamente coincidentes, à exceção do provete P1 que apresenta na parte final do ensaio uma queda um pouco mais acentuada da carga.

Quanto à localização das zonas condicionantes, no provete P1 deu-se a formação de vincos junto de uma das cargas pontuais e ao nível dos bordos de reforço, enquanto os provetes P2 e P3 apresentaram vincos junto dos dois pontos de aplicação da carga e ao nível dos bordos de reforço. É de salientar novamente a proximidade entre valores de deformação a meio vão nos três provetes para as correspondentes cargas máximas e a uniformidade dos valores relativos a essas cargas máximas.

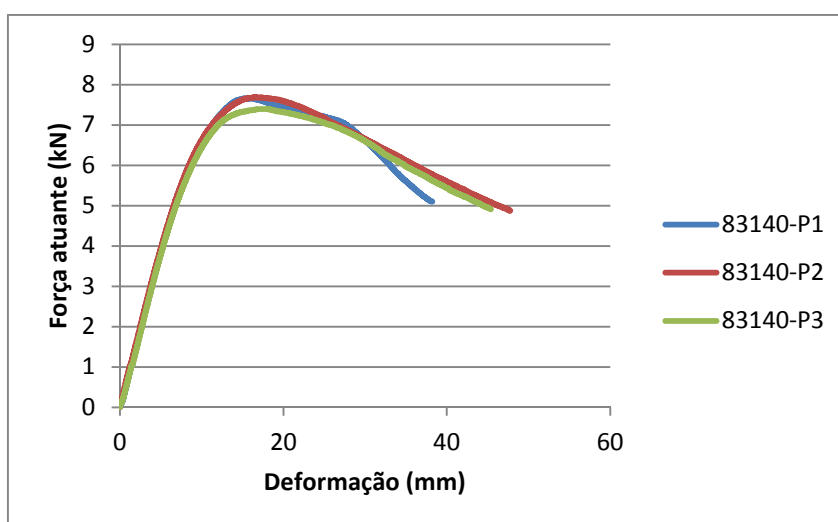


Figura 4-42: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão, para os provetes do tipo 90x1.5\_Fz1\_Liso.

Tabela 4-17: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 90x1.5\_Fz1\_Liso.

Designação	Força máxima (kN)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83140 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 63796 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83073 (mm)
90x1.5_Fz1_Liso_P1	7.65	15.10	12.43	11.63
90x1.5_Fz1_Liso_P2	7.69	16.59	12.68	13.03
90x1.5_Fz1_Liso_P3	7.39	16.81	13.08	12.92
Média	7.58			
Desvio padrão	0.16			
Coefficiente de variação	2.15%			

Na Figura 4-43 apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, obtidas pelo transdutor 83140 para os provetes do tipo 150×1.5\_Fz1\_Furos. Denotam-se algumas diferenças entre as curvas após a carga máxima, nomeadamente na deformação registada a meio vão correspondente à força máxima, que difere um pouco entre os três provetes. O provete P1 é o que apresenta maior deformação com 37.43 mm e o provete P3 o que apresenta menor deformação com 31.42 mm.

A localização das zonas condicionantes foi idêntica para os três provetes, com a formação de vincos entre os pontos de aplicação das cargas pontuais e ao nível dos bordos de reforço (consultar Tabela 4-10). Nos valores de carga máxima destaca-se mais uma vez a sua uniformidade por apresentarem um desvio padrão de 0.21 kN e um coeficiente de variação inferior a 4.40%.

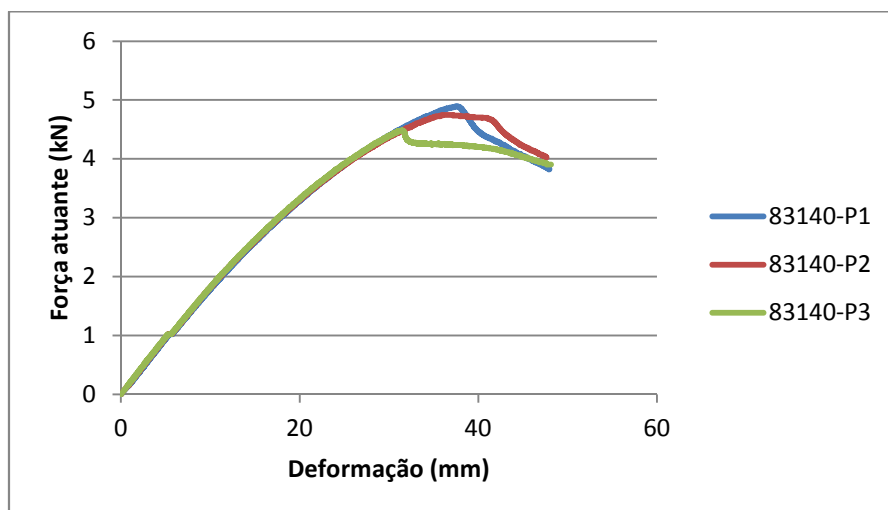


Figura 4-43: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão, para os provetes do tipo 150×1.5\_Fz1\_Furos.



Tabela 4-18: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 150x1.5\_Fz1\_Furos.

Designação	Força máxima (kN)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83140 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 63796 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83073 (mm)
150x1.5_Fz1_Furos_P1	4.9	37.43	30.21	31.13
150x1.5_Fz1_Furos_P2	4.75	35.94	29.27	28.61
150x1.5_Fz1_Furos_P3	4.49	31.42	25.83	25.88
Média	4.71			
Desvio padrão	0.21			
Coeficiente de variação	4.40%			

Na Figura 4-44, apresentam-se as curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, obtidas pelo transdutor 83140 para os provetes do tipo 150x1.5\_Fz1\_Liso. Constata-se um comportamento semelhante das curvas para os três provetes, com valores de deformação idênticos para a carga máxima (ver Tabela 4-19).

O comportamento também é semelhante em termos da localização das zonas condicionantes, com a formação de vincos entre os pontos de aplicação das cargas pontuais e ao nível dos bordos de reforço (consultar Tabela 4-10). Volta-se a verificar novamente a uniformidade dos valores correspondentes à carga máxima, pelo facto de apresentarem um desvio padrão de 0.03 kN e um coeficiente de variação de 0.70%.

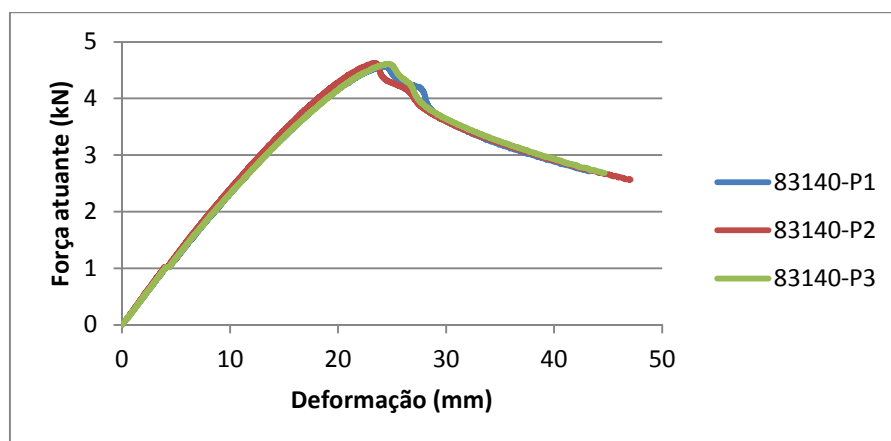


Figura 4-44: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão, para os provetes do tipo 150x1.5\_Fz1\_Liso.

Tabela 4-19: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 150×1.5\_Fz1\_Liso.

Designação	Força máxima (kN)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83140 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 63796 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83073 (mm)
150x1.5_Fz1_Liso_P1	4.57	23.93	20.99	22.10
150x1.5_Fz1_Liso_P2	4.63	23.12	20.48	**
150x1.5_Fz1_Liso_P3	4.62	24.39	21.53	22.40
Média	4.61			
Desvio padrão	0.03			
Coeficiente de variação	0.70%			

Nota: Problema com o transdutor \*\*

#### 4.7.3 Ensaaios com solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão, z2

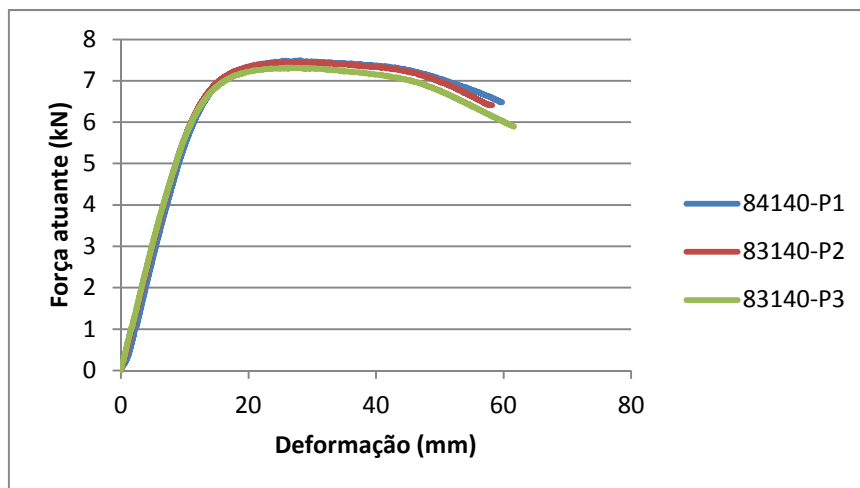
Na Figura 4-45 apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, obtidas pelo transdutor 83140 para os provetes do tipo 90×1.5\_Fz2\_Furos e 90×1.5\_Fz2\_Liso.

Relativamente aos ensaios do tipo 90×1.5\_Fz2\_Furos, pode-se observar na Figura 4-45 que as curvas são praticamente coincidentes, com níveis de deformação próximos na secção de meio vão para as correspondentes cargas máximas (consultar Tabela 4-20). Este comportamento semelhante também se evidencia quanto à localização da zona condicionante que se dá aproximadamente a meio vão sobre a abertura. Importa salientar que aquando da realização dos ensaios estes provetes praticamente não apresentaram qualquer instabilidade antes de atingir a sua resistência máxima.

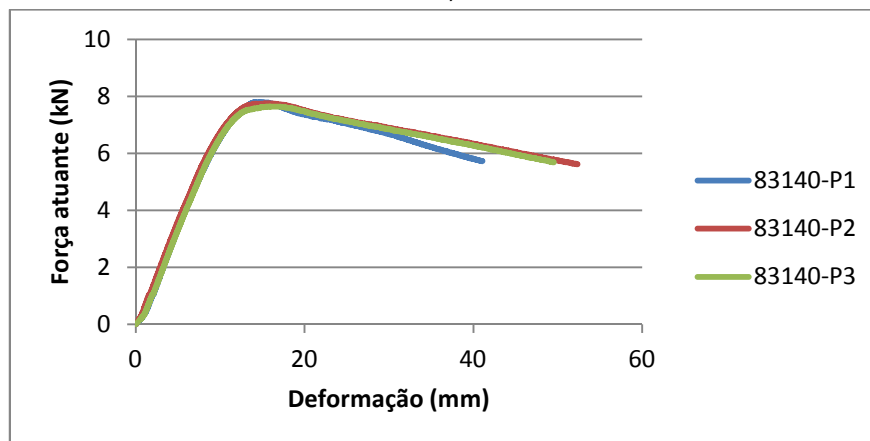
Quanto aos ensaios do tipo 90×1.5\_Fz2\_Liso, volta-se a verificar uma proximidade nos valores da deformação na secção de meio vão para as cargas máximas (consultar Tabela 4-21). No entanto, destaca-se uma ligeira diferença da curva referente ao provete P1, na parte final do ensaio, quando comparada com as curvas dos provetes P2 e P3. Na localização das zonas condicionantes também se observaram diferenças entre o provete P1 e os restantes. No provete P1, a zona condicionante dá-se entre a secção de meio vão e

o ponto de aplicação da carga, enquanto nos provetes P2 e P3 se dá aproximadamente a meio vão (consultar Tabela 4-11).

É de salientar a uniformidade dos valores relativos às cargas máximas em ambos os casos. Observa-se também na Figura 4-45 que os provetes do tipo 90×1.5\_Fz2\_Liso apresentam uma perda de carga mais acentuada após ser atingida a sua resistência máxima, comparativamente com os provetes do tipo 90×1.5\_Fz2\_Furos.



a)



b)

Figura 4-45: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão: a) provetes do tipo 90×1.5\_Fz2\_Furos e b) provetes do tipo 90×1.5\_Fz2\_Liso.

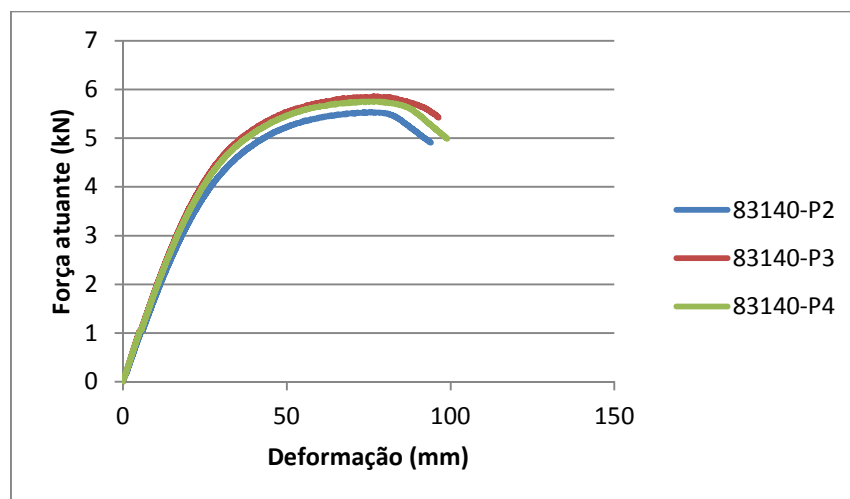
Tabela 4-20: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 90x1.5\_Fz2\_Furos.

Designação	Força máxima (kN)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83140 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 63796 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83073 (mm)
90x1.5_Fz2_Furos_P1	7.39	28.16	-	20.91
90x1.5_Fz2_Furos_P2	7.45	27.23	19.21	21.05
90x1.5_Fz2_Furos_P3	7.31	25.88	18.50	19.05
Média	7.42			
Desvio padrão	0.09			
Coefficiente de variação	1.27%			

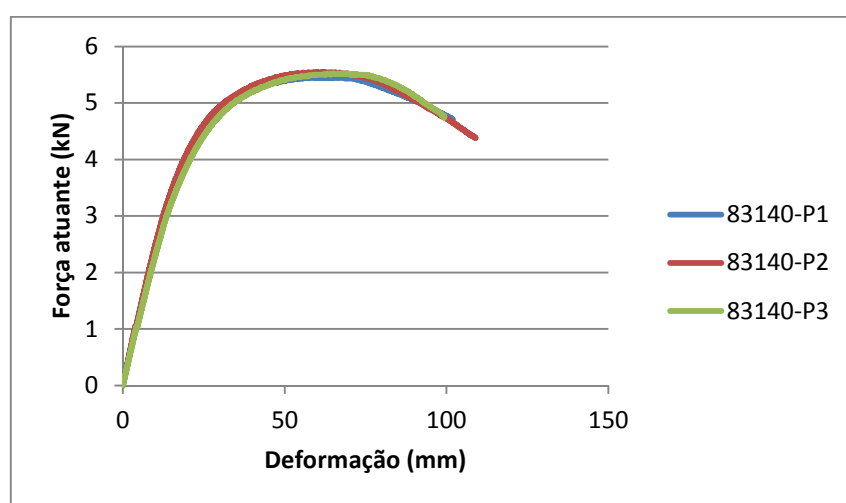
Tabela 4-21: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 90x1.5\_Fz2\_Liso.

Designação	Força máxima (kN)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83140 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 63796 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83073 (mm)
90x1.5_Fz2_Liso_P1	7.79	14.17	11.39	11.39
90x1.5_Fz2_Liso_P2	7.75	15.20	10.70	11.38
90x1.5_Fz2_Liso_P3	7.64	15.43	11.59	11.43
Média	7.73			
Desvio padrão	0.08			
Coefficiente de variação	1.01%			

Na Figura 4-46 apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, obtidas pelo transdutor 83140 para os provetes do tipo 150x1.5\_Fz2\_Furos e 150x1.5\_Fz2\_Liso. Verifica-se um comportamento semelhante das curvas em todos os provetes de cada designação tipo. A localização das zonas condicionantes também é idêntica, verificando-se aproximadamente a meio vão (consultar Tabela 4-11). Esta localização idêntica das zonas condicionantes reforça este comportamento semelhante evidenciado pelos provetes. Volta-se a verificar uma uniformidade dos valores de carga máxima para cada uma das designações tipo (consultar Tabela 4-22 e Tabela 4-23).



a)



b)

Figura 4-46: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão: a) provetes do tipo 150x1.5\_Fz2\_Furos e b) provetes do tipo 150x1.5\_Fz2\_Liso.

Tabela 4-22: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 150x1.5\_Fz2\_Furos.

Designação	Força máxima (kN)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83140 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 63796 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83073 (mm)
150x1.5_Fz2_Furos_P2	5.54	73.39	55.20	57.20
150x1.5_Fz2_Furos_P3	5.85	76.22	56.82	59.14
150x1.5_Fz2_Furos_P4	5.75	72.39	53.75	54.52
Média	5.71			
Desvio padrão	0.16			
Coeficiente de variação	2.77%			

Tabela 4-23: Força máxima e deslocamentos correspondentes, para os ensaios do tipo 150×1.5\_Fz2\_Liso.

Designação	Força máxima (kN)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83140 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 63796 (mm)	Deslocamento correspondente à força máxima no transdutor 83073 (mm)
150x1.5_Fz2_Liso_P1	5.46	57.59	43.06	44.45
150x1.5_Fz2_Liso_P2	5.55	60.00	48.07	44.48
150x1.5_Fz2_Liso_P3	5.52	63.54	47.57	45.85
Média	5.51			
Desvio padrão	0.05			
Coeficiente de variação	0.83%			

## 4.8 Comparações/análise dos resultados

De seguida, apresenta-se para cada tipo de solicitação algumas comparações, relativas aos modos de instabilidade, cargas máximas e deslocamentos correspondentes na secção de meio vão. Apresentam-se tabelas resumo para cada tipo de solicitação, com os valores médios da força máxima e dos deslocamentos a meio vão correspondentes a essa força máxima.

### 4.8.1 Ensaaios com solicitação segundo o eixo de maior inércia, yy

Para os ensaios referentes às designações tipo 90×1.5\_Fyy\_Furos e 90×1.5\_Fyy\_Liso os provetes com espessura de chapa saliente de 14 mm apresentaram diferenças relativamente aos restantes, nomeadamente na localização das zonas condicionantes e na deformação a meio vão para a carga máxima. Destaca-se o facto de existirem algumas dificuldades na interpretação dos modos de instabilidade locais. Nestas duas designações tipo observaram-se o modo de instabilidade global por-flexão-torção, o modo de instabilidade local de placa e o modo distorcional. No entanto, o modo distorcional só é visível nos provetes com espessura de 14mm na chapa saliente, o que causou alguma surpresa porque este modo de instabilidade encontra-se associado à presença de reforço de bordo e não foi notório nos restantes provetes.

De salientar que os provetes do tipo 90×1.5\_Fyy\_Liso apresentam uma carga máxima cerca de 8.7% superior aos provetes do tipo 90×1.5\_Fyy\_Furos e uma deformação a meio vão cerca de 23.1% inferior (consultar Tabela 4-24). Este facto revela que a presença das aberturas na alma condicionou a capacidade resistente dos perfis do tipo 90×1.5\_Fyy\_Furos e também a sua rigidez.

Quanto aos ensaios referentes às designações tipo 150×1.5\_Fyy\_Furos e 150×1.5\_Fyy\_Liso, observaram-se o modo de instabilidade global por flexão-torção e o modo de instabilidade local de placa em todos os provetes. Observou-se também o modo de instabilidade distorcional no provete P2 da designação 150×1.5\_Fyy\_Liso e no provete P2 da designação 150×1.5\_Fyy\_Furos. Mais uma vez se destaca que modo de instabilidade distorcional se encontra associado à existência de reforço de bordo.

A presença das aberturas na alma foi mais uma vez condicionante na resistência dos provetes correspondentes à designação 150×1.5\_Fyy\_Furos. Através da observação da Tabela 4-24, constata-se uma carga máxima cerca de 2.8% inferior à dos provetes tipo 150×1.5\_Fyy\_Liso e uma deformação a meio vão cerca de 29.8% superior.

Tabela 4-24: Valores médios dos resultados dos ensaios com solicitação segundo o eixo de maior inércia, yy.

Designação tipo	Média da força máxima (kN)	Média dos deslocamentos a meio vão correspondentes à força máxima (mm)	Desvio padrão para a força máxima (kN)	Coeficiente de variação para a força máxima (%)	Desvio padrão para os deslocamentos a meio vão correspondentes à força máxima (mm)	Coeficiente de variação para os deslocamentos a meio vão correspondentes à força máxima (%)
90×1.5_Fyy_Furos	18.53	12.60	0.82	4.43	1.97	15.64
90×1.5_Fyy_Liso	20.30	9.69	0.08	0.37	9.69	26.98
150×1.5_Fyy_Furos	23.55	12.50	0.19	0.80	0.87	6.96
150×1.5_Fyy_Liso	24.23	8.78	0.27	1.11	0.12	1.37

#### **4.8.2 Ensaaios com solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração, z1**

Os ensaios correspondentes às designações do tipo 90×1.5\_Fz1\_Furos e 90×1.5\_Fz1\_Liso apresentaram modo de instabilidade local de placa e modo distorcional. Quanto à localização das zonas condicionantes, verificou-se que foram muito semelhantes em todos os provetes das duas designações, com a formação de vincos junto dos pontos de aplicação da carga e ao nível do bordo de reforço. A exceção corresponde ao provete P1 do tipo 90×1.5\_Fz1\_Liso que apresentou a formação de vincos apenas junto de uma das cargas pontuais e ao nível dos bordos de reforço.

Os provetes do tipo 90×1.5\_Fz1\_Liso apresentaram uma carga máxima cerca de 8.8% superior aos provetes do tipo 90×1.5\_Fz1\_Furos e uma deformação a meio vão cerca de 12.1% inferior (consultar Tabela 4-25). Este facto revela mais uma vez que a presença das aberturas na alma condiciona a capacidade resistente dos perfis 90×1.5\_Fz1\_Furos e a sua rigidez.

Nos provetes do tipo 150×1.5\_Fz1\_Furos e 150×1.5\_Fz1\_Liso, os modos de instabilidade observados foram novamente o modo de instabilidade local de placa e o modo distorcional. A localização das zonas condicionantes foi em todos os provetes semelhante, com a formação de vincos entre os pontos de aplicação das cargas pontuais e ao nível dos bordos de reforço.

Os provetes do tipo 150×1.5\_Fz1\_Liso apresentaram uma carga máxima cerca de 2.1% inferior à carga máxima medida nos provetes do tipo 150×1.5\_Fz1\_Furos e uma deformação a meio vão cerca de 31.8% inferior (consultar Tabela 4-25). A influência das aberturas demonstram que a carga máxima é idêntica nos perfis com e sem aberturas, mas com uma deformação maior nos perfis com aberturas (consultar Tabela 4-25).

.



Tabela 4-25: Valores médios dos resultados dos ensaios com solicitação segundo o eixo de menor inércia, z1.

Designação tipo	Média da força máxima (kN)	Média dos deslocamentos a meio vão correspondentes à força máxima (mm)	Desvio padrão para a força máxima (kN)	Coeficiente de variação para a força máxima (%)	Desvio padrão para os deslocamentos a meio vão correspondentes à força máxima (mm)	Coeficiente de variação para os deslocamentos a meio vão correspondentes à força máxima (%)
90×1.5_Fz1_Furos	6.91	18.38	0.10	0.80	0.84	4.59
90×1.5_Fz1_Liso	7.58	16.16	0.16	2.15	0.93	5.74
150×1.5_Fz1_Furos	4.71	34.93	0.21	4.40	3.13	8.96
150×1.5_Fz1_Liso	4.61	23.81	0.03	0.70	0.64	2.69

#### 4.8.3 Ensaaios com solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão, z2

Os ensaios correspondentes às designações do tipo 90×1.5\_Fz2\_Furos e 90×1.5\_Fz2\_Liso apresentaram o modo de instabilidade local de placa em todos os provetes. A localização das zonas condicionantes foi idêntica, deu-se aproximadamente a meio vão, com exceção do provete P1 do tipo 90×1.5\_Fz2\_Liso, onde a instabilidade se deu junto à zona de aplicação de uma das cargas pontuais.

Os provetes do tipo 90×1.5\_Fz2\_Liso apresentaram uma carga máxima cerca de 4% superior à dos provetes do tipo 90×1.5\_Fz2\_Furos e uma deformação cerca de 44.9% inferior, como se pode constatar através da Tabela 4-26. Este facto revela que a presença das aberturas na alma condiciona a resistência dos perfis e a sua rigidez.

Os provetes do tipo 150×1.5\_Fz2\_Furos e 150×1.5\_Fz2\_Liso apresentaram, tal como os provetes do tipo 90×1.5\_Fz2\_Furos e 90×1.5\_Fz2\_Liso, o modo de instabilidade local de placa em todos os provetes. A localização das zonas condicionantes também foi idêntica em todos os provetes, dando-se aproximadamente a meio vão.

Os provetes do tipo 150×1.5\_Fz2\_Liso apresentaram uma carga máxima média cerca de 3.5% inferior à dos provetes do tipo 150×1.5\_Fz2\_Furos e uma deformação cerca de 18.4% inferior, como se pode constatar através na Tabela 4-26. Neste caso, denota-se

maior proximidade nos valores de carga máxima entre os perfis com e sem abertura, mas uma deformação a meio vão inferior nos perfis do tipo Liso.

Um aspeto importante que se verificou nestes ensaios com solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão, foi a ausência do modo de instabilidade distorcional. Voltou-se a verificar a ausência do modo de instabilidade global por flexão-torção, por se tratarem de secções monossimétricas com solicitação segundo o eixo de menor inércia.

Tabela 4-26: Valores médios dos resultados dos ensaios com solicitação segundo o eixo de menor inércia,  $z_2$

Designação tipo	Média da força máxima (kN)	Média dos deslocamentos a meio vão correspondentes à força máxima (mm)	Desvio padrão para a força máxima (kN)	Coefficiente de variação para a força máxima (%)	Desvio padrão para os deslocamentos a meio vão correspondentes à força máxima (mm)	Coefficiente de variação para os deslocamentos a meio vão correspondentes à força máxima (%)
90x1.5_Fz2_Furos	7.42	27.09	0.09	1.27	1.15	4.24
90x1.5_Fz2_Liso	7.73	14.93	0.08	1.01	0.67	4.48
150x1.5_Fz2_Furos	5.71	74	0.16	2.77	1.99	2.68
150x1.5_Fz2_Liso	5.51	60.38	0.05	0.83	2.99	4.96

#### 4.9 Comparação em regime elástico das inércias obtidas experimentalmente e analiticamente

O deslocamento a meio vão, para um sistema simplesmente apoiado submetido a duas cargas pontuais é dado pela equação (4-2), (Reis et al., 2010), em que  $E$  corresponde ao módulo de elasticidade do material,  $I$  corresponde à inércia em torno do eixo de solicitação,  $l$  corresponde ao comprimento do vão,  $a$  corresponde à distância entre o apoio e o ponto de aplicação da carga pontual e  $P$  a carga aplicada pelo atuador.

$$\delta = \frac{a \times (3 \times l^2 - 4 \times a^2)}{48 \times E \times I} \times P \quad (4-2)$$

A rigidez de uma estrutura, dada pela equação (4-3), relaciona o carregamento aplicado à estrutura com a correspondente deformação a meio vão, em que  $U$  são deslocamentos e  $Q$  são cargas aplicadas à estrutura.

$$K \times U = Q \quad (4-3)$$

Obtém-se a rigidez dos perfis para cada designação tipo através das curvas que relacionam a força com a deformação vertical, na secção de meio vão, sendo esta dada pela inclinação da curva, medida em regime linear elástico. Através da rigidez obtida experimentalmente, determina-se a inércia experimental, que em regime elástico é dada pela equação (4-4). Para o módulo de elasticidade usa-se o valor de 210 GPa, tal como, definido na cláusula 3.2.6 da EN 1993-1-1.

$$I = \frac{k \times a \times (3 \times l^2 - 4 \times a^2)}{48 \times E} \quad (4-4)$$

As inércias analíticas são obtidas com base na ferramenta de cálculo desenvolvida no Capítulo 3 e dizem respeito à secção bruta. Para os casos de flexão segundo o eixo de menor inércia, com banzo maior à tração e à compressão, as inércias analíticas são iguais.

Na Tabela 4-27, apresenta-se a relação entre a inércia analítica e a inércia experimental das secções em estudo, para a flexão segundo o eixo de maior inércia. As secções transversais com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, referentes aos perfis EMC 90×1.5 e EMC 150×1.5 apresentam uma diferença entre inércias de 93% e 86%, respetivamente. As secções transversais sem abertura, referentes aos perfis EMC 90×1.5 e EMC 150×1.5 apresentam uma diferença entre inércias de 46% e 50%, respetivamente.

Na Tabela 4-28, apresenta-se a relação entre a inércia analítica e a inércia experimental das secções em estudo, para a flexão segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração. As secções transversais com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, referentes aos perfis EMC 90×1.5 e EMC 150×1.5 apresentam uma diferença entre inércias de 64 % e 52%, respetivamente. As secções transversais sem abertura apresentam uma diferença entre inércias de 40% aproximadamente.

Na Tabela 4-29, apresenta-se a relação entre a inércia analítica e a inércia experimental das secções em estudo, para a flexão segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão. As secções transversais com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura referentes aos perfis EMC 90×1.5 e EMC 150×1.5 apresentam uma diferença entre inércias de 64% e 49%, respetivamente. As secções transversais sem abertura referentes aos perfis EMC 90×1.5 e EMC 150×1.5 apresentam uma diferença entre as inércias de 59% e 38% respetivamente.

Tabela 4-27: Inércia analítica e a experimental - flexão segundo o eixo de maior inércia.

Designação	K (kN/mm)	Inércia experimental (mm <sup>4</sup> )	Inércia experimental média (mm <sup>4</sup> )	Inércia analítica (mm <sup>4</sup> )	Inércia analítica / Inércia experimental
90x1.5_Fyy_Furos_P1	3.02	204375.89	206387.00	397735.12	1.93
90x1.5_Fyy_Furos_P2	2.71	183196.73			
90x1.5_Fyy_Furos_P3	3.47	234802.77			
90x1.5_Fyy_Furos_P4	3.01	203172.61			
90x1.5_Fyy_Liso_P1	4.28	289092.55	269125.68	392154.05	1.46
90x1.5_Fyy_Liso_P2	3.32	224446.41			
90x1.5_Fyy_Liso_P3	4.35	293838.09			
150x1.5_Fyy_Furos_P2	*	*	*	*	*
150x1.5_Fyy_Furos_P4	2.36	625761.04	699345.17	1301869.10	1.86
150x1.5_Fyy_Furos_P6	2.74	725098.29			
150x1.5_Fyy_Furos_P7	2.82	747176.18			
150x1.5_Fyy_Liso_P1	3.25	860852.12	870791.15	1306371.05	1.50
150x1.5_Fyy_Liso_P2	3.28	870287.57			
150x1.5_Fyy_Liso_P3	3.32	881233.75			

Nota: \*Problema com o transdutor, que impediu a quantificação da deformação do provete

Tabela 4-28: Inércia analítica e a experimental - flexão segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração.

Designação	K (kN/mm)	Inércia experimental (mm <sup>4</sup> )	Inércia experimental média (mm <sup>4</sup> )	Inércia analítica (mm <sup>4</sup> )	Inércia analítica / Inércia experimental
90x1.5_Fz1_Furos_P1	0.58	38971.55	39090.98	64197.20	1.64
90x1.5_Fz1_Furos_P2	0.56	37754.75			
90x1.5_Fz1_Furos_P3	0.60	40546.64			
90x1.5_Fz1_Liso_P1	0.76	51099.04	51862.93	72913.48	1.41
90x1.5_Fz1_Liso_P2	0.79	53694.89			
90x1.5_Fz1_Liso_P3	0.75	50794.84			
150x1.5_Fz1_Furos_P1	0.17	46170.09	46611.82	70733.82	1.52
150x1.5_Fz1_Furos_P2	0.18	46726.67			
150x1.5_Fz1_Furos_P3	0.18	46938.70			
150x1.5_Fz1_Liso_P1	0.23	61118.38	62099.03	86463.02	1.39
150x1.5_Fz1_Liso_P2	0.24	63821.80			
150x1.5_Fz1_Liso_P3	0.23	61356.92			

Tabela 4-29: Inércia analítica e experimental - flexão segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão.

Designação	K (kN/mm)	Inércia experimental (mm <sup>4</sup> )	Inércia experimental média (mm <sup>4</sup> )	Inércia analítica (mm <sup>4</sup> )	Inércia analítica / Inércia experimental
90x1.5_Fz2_Furos_P1	0.54	36585.27	39104.50	64197.20	1.64
90x1.5_Fz2_Furos_P2	0.59	40053.16			
90x1.5_Fz2_Furos_P3	0.60	40675.08			
90x1.5_Fz2_Liso_P1	0.66	44933.90	45999.73	72913.48	1.59
90x1.5_Fz2_Liso_P2	0.71	48124.63			
90x1.5_Fz2_Liso_P3	0.66	44940.66			
150x1.5_Fz2_Furos_P2	0.17	44632.85	47345.10	70733.82	1.49
150x1.5_Fz2_Furos_P3	0.19	49112.04			
150x1.5_Fz2_Furos_P4	0.18	48290.41			
150x1.5_Fz2_Liso_P1	0.24	63318.22	62611.44	86463.02	1.38
150x1.5_Fz2_Liso_P2	0.24	64855.45			
150x1.5_Fz2_Liso_P3	0.23	59660.66			

Entre as inércias analíticas e inércias experimentais, verifica-se que as inércias analíticas em todos os casos são superiores às experimentais. A diferença significativa entre as inércias analíticas e as inércias experimentais poderá estar relacionada com imprecisões na execução dos ensaios experimentais e com a caracterização geométrica das secções transversais dos perfis em estudo, que podem apresentar defeitos que não considerados na secção ideal.

## **5. SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM PERFIS ENFORMADOS A FRIO SUBMETIDOS À FLEXÃO, COM SECÇÃO EM C E ABERTURAS NA ALMA**

### **5.1 Considerações gerais**

Neste capítulo, são efetuados estudos de simulação numérica em barras metálicas submetidas a flexão. O estudo utiliza o Software Abaqus/Standard que tem por base o Método de Elementos Finitos associado a algoritmos de análise não linear. São realizadas simulações nos perfis EMC 90×1.5 sem aberturas e EMC 90×1.5 com aberturas e bordo reentrante ao longo da abertura, submetidos à flexão, num total de 6 modelos:

- ✓ Modelo 90×1.5\_Fyy\_Furos: perfil com 90 mm de altura e 1.5 mm de espessura, com aberturas na alma e bordo reentrante ao longo das aberturas; submetido a flexão simples segundo o eixo de maior inércia; carregamento aplicado no centro de corte da secção transversal.
- ✓ Modelo 90×1.5\_Fyy\_Liso: perfil com 90 mm de altura e 1.5 mm de espessura, sem aberturas na alma; submetido a flexão simples segundo o eixo de maior inércia; carregamento aplicado no centro de corte da secção transversal.
- ✓ Modelo 90×1.5\_Fz1\_Furos: perfil com 90 mm de altura e 1.5 mm de espessura, com aberturas na alma e bordo reentrante ao longo das aberturas; submetido a flexão simples segundo o eixo de menor inércia; banzo menor comprimido.
- ✓ Modelo 90×1.5\_Fz1\_Liso: perfil com 90 mm de altura e 1.5 mm de espessura, sem aberturas na alma; submetido a flexão simples segundo o eixo de menor inércia; banzo menor comprimido.
- ✓ Modelo 90×1.5\_Fz2\_Furos: perfil com 90 mm de altura e 1.5 mm de espessura, com aberturas na alma e bordo reentrante ao longo das aberturas; submetido a flexão simples segundo o eixo de menor inércia; banzo maior comprimido.
- ✓ Modelo 90×1.5\_Fz2\_Liso: perfil com 90 mm de altura e 1.5 mm de espessura, sem aberturas na alma; submetido a flexão simples segundo o eixo de menor inércia; banzo maior comprimido.

Pretende-se comparar e calibrar os modelos numéricos desenvolvidos com os resultados obtidos nos ensaios experimentais desenvolvidos no Capítulo 4.

Procura-se que as simulações numéricas representem adequadamente os comportamentos observados nos ensaios experimentais. Neste sentido, são efetuadas análises considerando a não linearidade material e geométrica no comportamento dos modelos testados.

A simulação numérica com base nos métodos de elementos finitos depende ainda de outros fatores como, as condições de fronteira, as imperfeições geométricas, a malha de elementos finitos. Segundo Pham e Hancock (2010), as imperfeições geométricas correspondem a perturbações na geometria, as quais são adicionadas ao modelo “perfeito” para criar deformações fora do plano nos elementos de chapa. Neste estudo, as imperfeições geométricas não são tidas em conta, apesar de ser possível confirmar a sua presença, aquando da realização dos ensaios experimentais.

Um outro aspeto relevante são as tensões residuais, que resultam do processo de enformagem a frio. Particularmente, nas zonas de dobragem da chapa, verifica-se um aumento da tensão de cedência e da tensão última e uma diminuição da ductilidade do material. Segundo Shafer e Pekoz (1998), não existe consenso sobre a distribuição ou magnitude nos valores destas propriedades, de forma a poderem ser utilizados na modelação das imperfeições geométricas e das tensões residuais.

Na modelação numérica, a malha e tipo de elemento são aspetos também importantes porque dependendo do tipo de elemento e da densidade da malha os resultados podem variar bastante. Neste sentido foram efetuados estudos sobre influência do tipo de elemento e do espaçamento de malha adotado.

Os modelos são construídos com elementos de casca que se caracterizam por apresentarem uma das dimensões significativamente inferior às outras duas. A sua utilização resulta da elevada esbelteza e reduzida espessura das chapas utilizadas no fabrico de perfis enformados a frio. Uma vez que se utilizam elementos de casca na modelação, constroem-se os modelos com base na linha média da secção transversal. Um outro aspeto importante diz respeito ao facto de tirar partido da simetria existente nos modelos testados, de forma a reduzir o esforço computacional.

Com os modelos de métodos numéricos desenvolvidos pretende-se analisar os modos de instabilidade, determinar cargas máximas e efetuar uma análise de pós-encurvadura.

Pretende-se, tal como nos Capítulos 3 e 4, analisar também a influência da furação existente ao longo da alma. A existência de furação obriga a considerar uma análise tridimensional, devido às diferenças de rigidez ao longo do desenvolvimento longitudinal do perfil.

## 5.2 Não linearidade material e geométrica

Nos modelos desenvolvidos considera-se a não linearidade material e geométrica, por forma a conseguir uma modelação mais correta do comportamento dos perfis analisados. A simulação numérica não linear com base no Método de Elementos Finitos dos perfis submetidos à flexão permitirá identificar os modos de instabilidade, quantificar cargas máximas e efetuar uma análise de pós-encurvadura.

A não linearidade material corresponde à não linearidade da lei constitutiva do material. A sua introdução no Software Abaqus requer a definição de curvas tensão-deformação sob a forma de tensão verdadeira  $\sigma_{true}$  e extensão plástica verdadeira  $\epsilon^{pl}$ . A tensão verdadeira  $\sigma_{true}$  e a extensão plástica verdadeira  $\epsilon^{pl}$  são obtidas a partir das equações (5-1), (5-2) e (5-3) (Abaqus 6.11, 2011).

$$\sigma_{true} = \sigma \times (1 + \epsilon) \quad (5-1)$$

$$\epsilon^{pl} = \epsilon^{true} - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (5-2)$$

$$\epsilon^{true} = \ln(1 + \epsilon) \quad (5-3)$$

Na Tabela 5-1 são definidas as propriedades do material utilizadas nesta simulação numérica não linear. Como se pode constatar, utiliza-se um comportamento elástico - plástico bilinear para descrever a lei constitutiva do material (ver Figura 5-1). Os dois pontos utilizados para descrever este comportamento bilinear são obtidos através dos ensaios de tração que se encontram descritos no Capítulo 4. Os valores da tensão,  $\sigma$ , correspondem à tensão de cedência e à tensão última, os valores da extensão,  $\epsilon$ , dizem respeito à extensão elástica e à extensão de pós-rotura. Para a definição do regime elástico, de acordo com a cláusula 3.2.6 da EN 1993-1-1, considera-se o módulo de elasticidade de 210 GPa e o coeficiente de Poisson de 0.3.



Tabela 5-1: Propriedades do material.

Ponto	Tensão $\sigma$ (MPa)	Extensão $\varepsilon$	Tensão verdadeira $\sigma_{true}$ (MPa)	Extensão total verdadeira $\varepsilon_{true}$	Extensão plástica verdadeira $\varepsilon^{pl}$
1	380.45	0.0018	381.14	0.0018	0
2	444.84	0.17	520.46	0.157	0.155

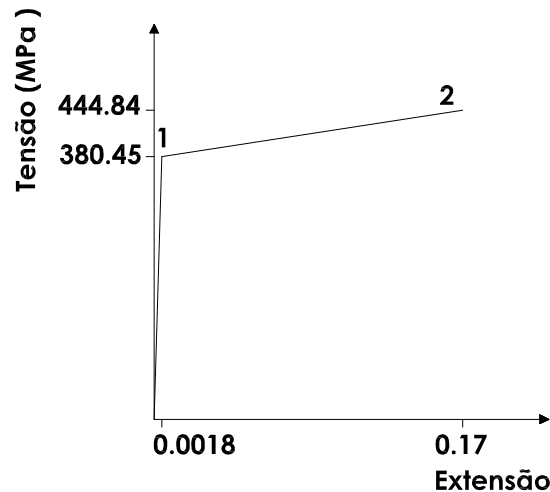


Figura 5-1: Relação entre a tensão,  $\sigma$  e a extensão,  $\varepsilon$  utilizada para descrever o comportamento do material.

A não linearidade geométrica corresponde a deslocamentos e/ou deformações que possam ser suficientemente importantes para que a configuração inicial não possa mais ser utilizada para exprimir equilíbrio e compatibilidade. A sua consideração deve-se principalmente ao facto dos perfis enformados a frio apresentarem deformações importantes que resultam da sua elevada esbelteza e baixa rigidez à torção.

As imperfeições geométricas e as tensões residuais não são consideradas nesta simulação numérica.

### 5.3 Processo de análise

Para que haja equilíbrio estático global é necessário existir equilíbrio entre as forças externas e as forças internas que atuam num sistema (Figura 5-2). Para a resolução de problemas não lineares, o Abaqus/Standard utiliza o Método de Newton-Raphson, que consiste na aplicação gradual e incremental de cargas até encontrar a solução final. Sendo que, para cada incremento podem existir varias iterações até encontrar a solução aceitável, a soma de todas as respostas incrementais correspondem à solução aproximada

para a análise não linear. Desta forma, o Abaqus combina procedimentos incrementais e iterativos para resolver problemas não lineares.

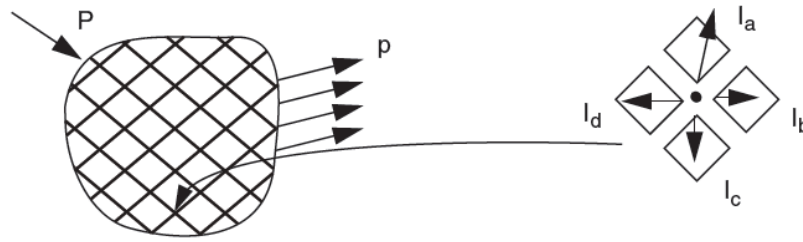


Figura 5-2: Cargas externas e internas num corpo, (versão 6.11 do Abaqus, 2011).

O Abaqus requer a definição do tamanho do primeiro incremento e seleciona automaticamente o tamanho dos incrementos seguintes. A escolha do incremento inicial em simulações não lineares poder ser crítica. Selecionou-se para o incremento inicial de deformação o valor de 10% da deformação total imposta, valor sugerido na versão 6.11 do Software Abaqus (2011), que refere tratar-se de um incremento usualmente suficiente. Quanto aos parâmetros de convergência, adotam-se valores por defeito definidos no Abaqus.

#### 5.4 Configuração dos modelos e condições de fronteira

Os modelos são construídos com base na linha média da secção transversal. Além disso, tira-se partido da simetria existente, de modo a reduzir o esforço computacional. Por forma a representar a simetria em todos os modelos, são impedidos os deslocamentos da secção de meio vão na direção axial à barra, tal como se mostra na Figura 5-3.

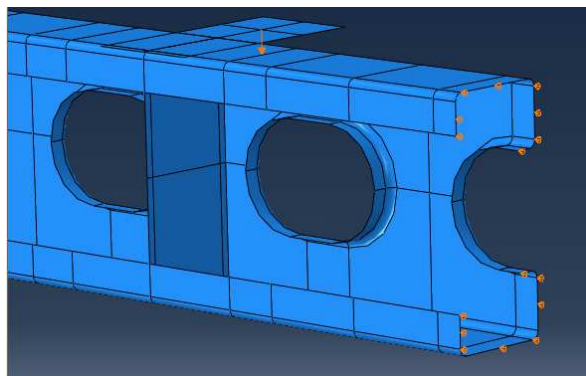


Figura 5-3: Pormenor relativo aos deslocamentos longitudinais que foram impedidos, modelo 90x1.5\_Fyy\_Furos.

De seguida faz-se uma apresentação da configuração geométrica dos modelos, das estratégias adotadas para modelar as chapas transversais e a chapa saliente sobre a qual atua a carga no centro de corte, condições de fronteira e condições de aplicação das cargas.

Quanto à geometria têm-se dois tipos: perfil sem aberturas ao longo da alma (ver Figura 5-4) e perfil com aberturas e bordo reentrante ao longo da abertura (ver Figura 5-5)

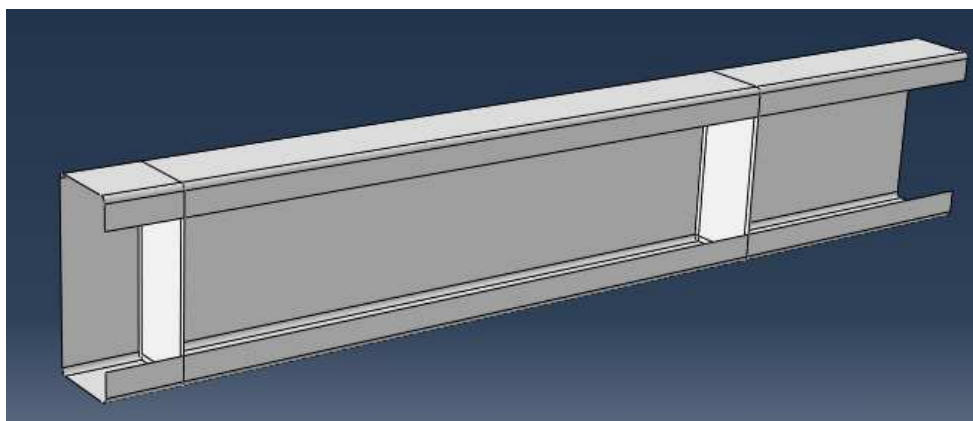


Figura 5-4: Perfil sem aberturas ao longo da alma.

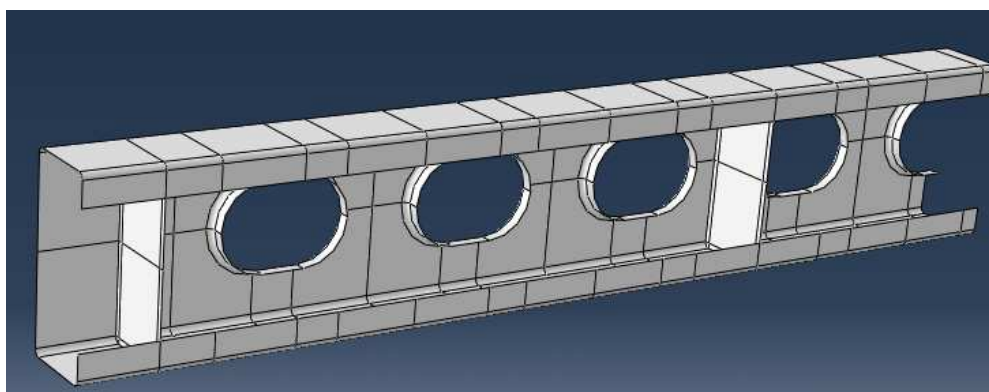


Figura 5-5: Perfil com aberturas e bordo reentrante ao longo da abertura.

As chapas transversais que se encontram sobre os apoios e ao nível dos pontos de aplicação da carga são modeladas como elementos constituintes do perfil, admitindo que existe continuidade entre os elementos. No entanto, é de salientar que, nos modelos físicos, estas chapas são soldadas ao perfil.

Nas chapas salientes referentes aos modelos de flexão segundo o eixo de maior inércia, utiliza-se a ligação do tipo “*tie*”, ver Figura 5-6. Este tipo de ligação permite fundir duas

regiões, embora as malhas criadas sobre essas superfícies possam ser diferentes (Abaqus 6.11, 2011). De salientar que a espessura utilizada em todos os modelos para a chapa saliente é de 14 mm.

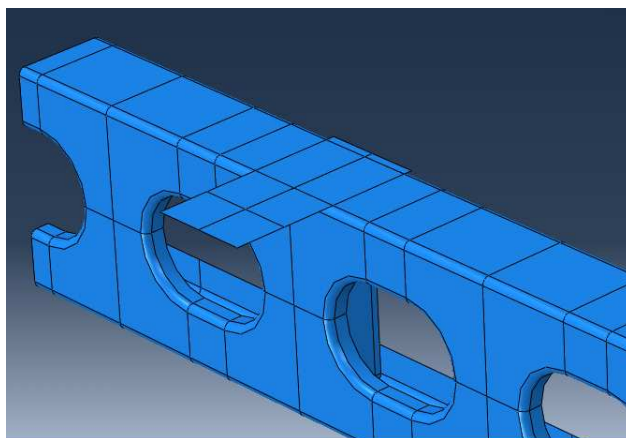


Figura 5-6: Pormenor da ligação entre a chapa saliente e o perfil para o modelo 90x1.5\_Fyy\_Furos.

As condições de fronteira consideradas nesta simulação numérica variam de acordo com o tipo de solicitação. Representam-se graficamente as condições de fronteira impostas para a flexão segundo o eixo de maior inércia na Figura 5-7, para a flexão segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração na Figura 5-8 e para a flexão segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão na Figura 5-9. Para os três casos descritos, são restringidos todos os deslocamentos ao nível do limite inferior da chapa transversal de extremidade, com exceção do deslocamento no sentido axial ao perfil. Ficando este alinhamento a funcionar como apoios simples. Os deslocamentos ao nível da secção transversal de meio vão são impedidos na direção axial ao perfil metálico para tirar partido da simetria destes elementos estruturais e desta forma reduzir o esforço computacional.

Nos modelos numéricos desenvolvidos, adota-se a imposição de deformações de valor crescente nos pontos de aplicação de carga, tal como foi feito na campanha de ensaios experimentais. Nos provetes sujeitos a flexão segundo o eixo de maior inércia, adota-se uma deformação pontual na chapa posicionada sobre o banzo superior da secção, na posição correspondente ao centro de corte da secção transversal (ver Figura 5-7). Nos provetes sujeitos a flexão segundo o eixo de menor inércia, adotam-se cargas uniformemente distribuídas, o que se traduz por impor uma deformação de valor crescente no limite superior das chapas transversais intermédias (ver Figura 5-8 e Figura

5-9). Com esta estratégia procura-se reproduzir os ensaios experimentais o mais adequadamente possível.

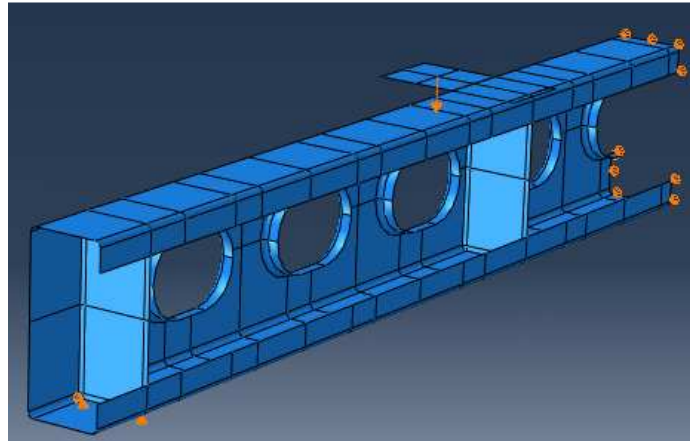


Figura 5-7: Condições de fronteira e condições de aplicação da carga para o modelo 90×1.5\_Fyy\_Furos.

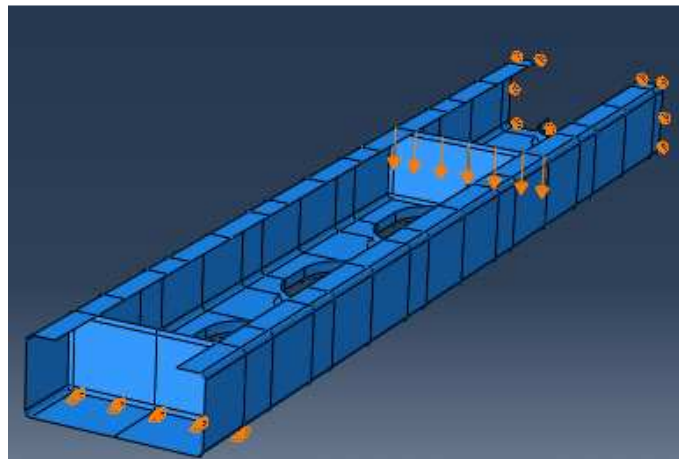


Figura 5-8: Condições de fronteira e condições de aplicação da carga para o modelo 90×1.5\_Fz1\_Furos.

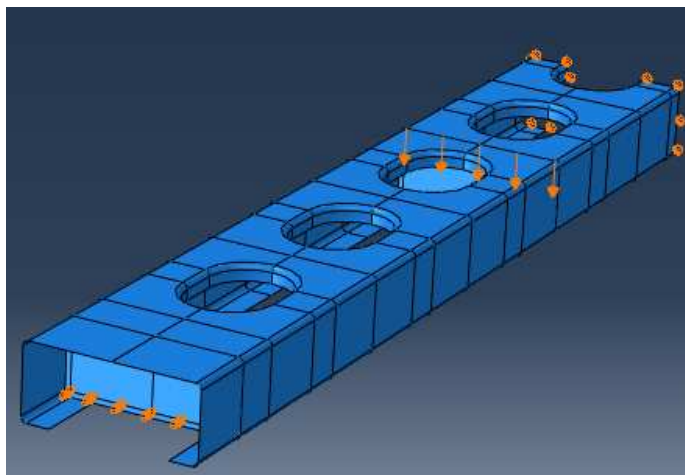


Figura 5-9: Condições de fronteira e condições de aplicação da carga para o modelo 90×1.5\_Fz2\_Furos.

## 5.5 Malha e tipo de elemento

A definição da malha é um dos processos mais importantes na modelação com MEF, porque os resultados podem variar significativamente em função do tipo de elemento e do seu tamanho. O Software Abaqus possui uma extensa biblioteca de elementos que podem ser utilizados, numa grande variedade de aplicações estruturais. A escolha do tipo de elemento é essencial para obter os modelos mais adequados aos fenómenos que se pretendem analisar.

No presente trabalho, utilizam-se elementos de casca, que se caracterizam por apresentarem uma dimensão ortogonal à superfície média bastante inferior às outras duas e as tensões desprezáveis na direção ortogonal. A sua utilização nesta simulação numérica deve-se ao facto dos perfis enformados a frio exibirem uma elevada esbelteza, com espessura muito reduzida.

O elemento S4 possui quatro locais de integração quando comparado com o S4R que possui apenas um local de integração. Neste estudo seleccionou-se o elemento S4R. Trata-se de um elemento de casca com 6 graus de liberdade (3 translações e 3 rotações), da classe “finite membrane strains”, elemento linear com 4 nós e com integração reduzida, ver Figura 5-10. Segundo Pham e Hancock (2010), trata-se de um elemento adequado para a análise de problemas geometricamente não lineares e com grandes deformações.

Quanto ao tipo de integração o Abaqus permite dois tipos, a integração completa e a integração reduzida. Neste ponto procura-se apenas dar ênfase ao tipo de integração a seleccionar. Para este estudo seleccionou-se o modelo 90×1.5\_Fz2\_Furos, com simulação numérica não linear. Na Figura 5-11, apresentam-se as curvas que relacionam a carga com a deformação, para os elementos S4R e S4. Por observação da Figura 5-11, verifica-se que ambos os elementos (S4 e S4R), apresentam um comportamento praticamente coincidente até à carga de pico. Após a carga de pico, denotam-se uma pequena diferença entre as curvas. Esta pequena diferença observada nas curvas, na prática não é de significativa importância. De acordo com os resultados referentes à Figura 5-11, e pelo facto do elemento S4 possuir maior custo computacional, por apresentar mais locais de integração, seleccionou-se o elemento com integração reduzida para todos os modelos.

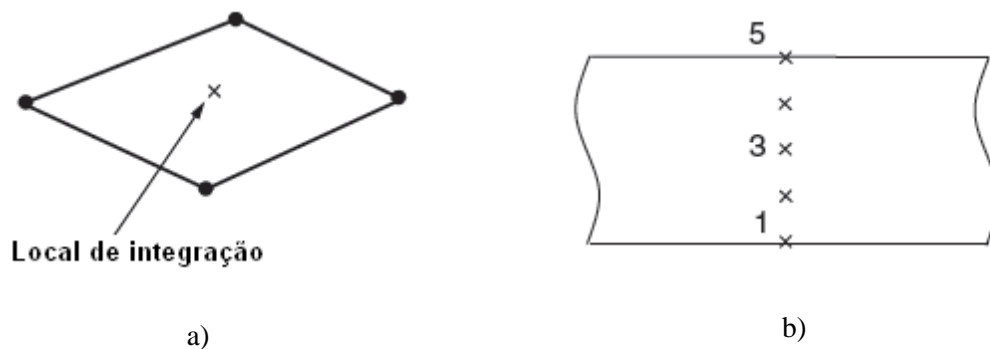


Figura 5-10: a) Elemento S4R. b) Pontos de integração através da espessura do elemento (versão 6.11 do Abaqus, 2011).

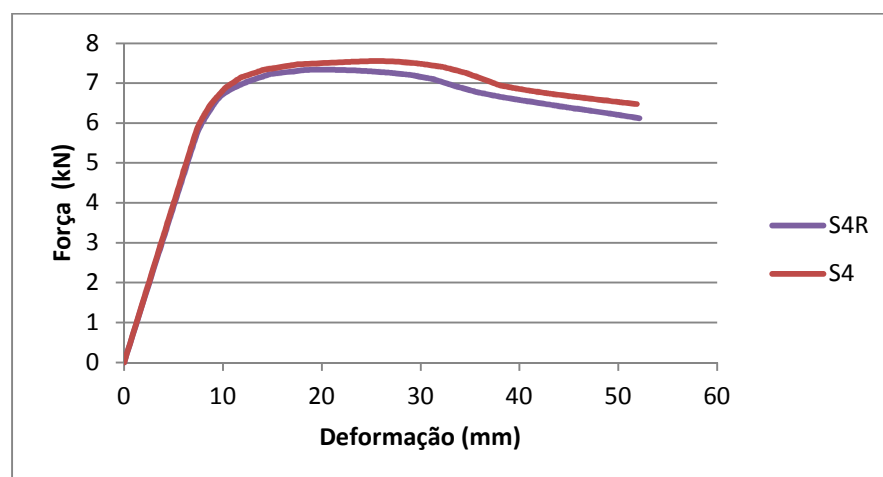


Figura 5-11: Efeito da integração reduzida.

Na especificação da espessura da secção transversal do elemento de casca o Abaqus permite a escolha de duas possibilidades: cálculo da rigidez durante a análise “during analysis” ou cálculo da rigidez antes da análise “before analysis”. Para esta simulação numérica seleccionou-se calcular a rigidez durante a análise “during analysis” porque é adequada para análises lineares e não lineares, enquanto o cálculo da rigidez antes da análise “before analysis” é apenas indicado para análises lineares. Utiliza-se o método de Simpson para a integração numérica dos 5 pontos adotados ao longo da secção transversal do elemento de casca (ver Figura 5-10 b).

O Abaqus possui três técnicas “top-down” para a geração da malha: “structured meshing”, “swept meshing” e “free meshing”. Para estes modelos, seleccionou-se a técnica de “structured meshing”, porque permite mais controlo sobre a malha e aplica padrões pré-estabelecidos de malha às tipologias. Para estes modelos procurou-se obter uma malha homogénea ao longo dos perfis, em que foi necessário efetuar partições aos perfis, por forma a subdividir um domínio complexo em subdomínios mais simples, devido às zonas de cantos arredondados e às aberturas. Outra técnica que também poderia ser possível para a geração da malha destes modelos é a “free meshing”, porque se trata de uma técnica flexível e pode ser aplicada a qualquer forma de modelo. Mas não usa nenhum padrão pré-estabelecido e fornece menor controlo sobre a malha. Sendo impossível prever a malha antes de esta ser criada. A “swept meshing”, é uma técnica limitada a modelos com tipologias e geometrias específicas. Cria malhas por varrimento, gerando internamente a malha numa face ou num vértice, varrendo por conseguinte a malha ao longo de um trajeto. O resultado pode ser uma malha bidimensional criada a partir de um vértice ou uma malha tridimensional criada a partir de uma face.

Relativamente ao tamanho dos elementos, foram analisadas três hipóteses: 5 mm, 7.5 mm e 15 mm. A seleção destas dimensões para o estudo do tamanho do elemento deve-se ao facto de estas dimensões estarem no intervalo de estudo (5 mm a 20 mm), desenvolvido por Pham e Hancock (2010) e por Wang e Zang (2009). O estudo foi efetuado no modelo 90x1.5\_Fz2\_Furos, com simulação numérica não linear. O tamanho dos elementos utilizados na modelação é um fator decisivo, porque quanto menor for esse valor, mais precisos são os resultados. No entanto, com a diminuição dos tamanhos dos elementos finitos, pode existir maior dificuldade em obter a convergência da solução numérica. Na



Figura 5-12, apresentam-se as curvas que relacionam a carga com a deformação, para as diferentes dimensões do elemento, e para o ensaio experimental P1. Nesta fase procura-se dar ênfase, à dimensão do elemento que melhor caracterize o comportamento experimental. Por observação da Figura 5-12, verifica-se que as malhas de 5 mm e de 7.5 mm apresentam curvas, com um comportamento praticamente coincidente até à carga máxima. Na fase final do ensaio apresentam comportamentos um pouco distintos. A malha de 15 mm apresenta uma carga máxima inferior às restantes e ao ensaio experimental. Por observação da Figura 5-12, atendendo ao comportamento das curvas e aos valores de carga máxima, verifica-se que a curva referente à malha de 7.5 mm é a que mais se aproxima do ensaio experimental. A curva de 5mm apesar de apresentar a carga máxima mais próxima do experimental, apresenta na fase final uma curva com um comportamento um pouco distinto do experimental. Posto isto, selecionou-se a malha de 7.5 mm para todos os modelos.

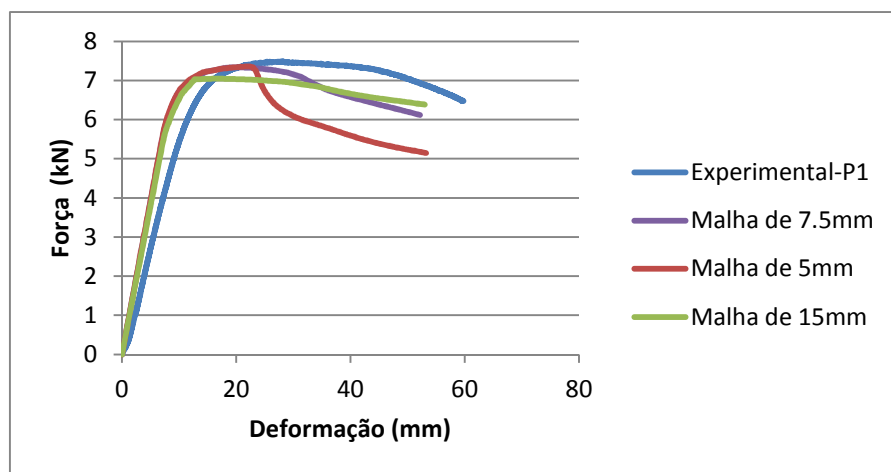


Figura 5-12: Relações entre força e deformação vertical na secção de meio vão.

Tabela 5-2: Influência da dimensão do elemento.

Malha	Dimensão do elemento (mm)	Número de elementos	Carga Máxima (kN)
1	5	4710	7.36
2	7.5	2370	7.34
3	15	936	7.07
Experimental-P1	-	-	7.49

## 5.6 Resultados, comparação entre a campanha de ensaios experimentais e os modelos de métodos numéricos

Neste tópico expõem-se os resultados referentes aos modelos numéricos desenvolvidos, e faz-se uma comparação/calibração com os experimentais. Para a apresentação dos resultados fez-se uma divisão de acordo com o tipo de solicitação: flexão segundo o eixo de maior inércia com carregamento aplicado no centro de corte da secção transversal,  $yy$ , e flexão segundo o eixo de menor inércia com banzo maior à tração e à compressão,  $z1$  e  $z2$ .

### 5.6.1 Modelos com solicitação segundo o eixo de maior inércia, $yy$

Na Figura 5-13, apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, obtidas com o modelo numérico desenvolvido e com os ensaios experimentais realizados, em perfis com aberturas, solicitados segundo o eixo de maior inércia e com carregamento no centro de corte da secção transversal, 90x1.5\_Fyy\_Furos. Devido a problemas com a convergência, não foi possível obter a totalidade da curva e o modo de instabilidade. A convergência é um fator importante na análise não linear com o Método dos Elementos Finitos, especialmente na simulação de secções com grandes deslocamentos. Segundo Schafer et al. (2010), num estudo sobre a modelação computacional, tanto de encurvadura elástica como da análise de colapso não linear em perfis de aço enformados a frio, referem que a solução de um modelo numérico é sensível a fatores como o método de resolução, a escolha do elemento e a discretização da malha, as condições de fronteira, a modelação do material, as imperfeições geométricas e as tensões residuais. Todos estes fatores têm impacto na solução e poderão estar na origem de falta de convergência. De referir que nesta análise se utilizou o procedimento de análise “Static General”, com um incremento inicial de deformação de 10% da deformação total e com valores padrão atribuídos aos parâmetros de controlo. O procedimento de análise geral “Static General” permite a análise de uma resposta linear e não linear.

Apenas o provete P4 apresenta uma espessura da chapa saliente de 14 mm, igual à do modelo numérico desenvolvido. Este provete apresenta uma zona de patamar junto da carga máxima inferior à dos restantes provetes, seguido com uma queda mais acentuada

da carga. Este aspeto também é notório no modelo numérico com uma pequena zona de patamar, e indicia uma queda acentuada da carga após a carga máxima, tal como o provete P4 (ver Figura 5-13).

A diferença entre a carga máxima numérica e a experimental é inferior a 10% (consultar a Tabela 5-3), com a carga máxima numérica superior à experimental. A deformação correspondente à carga máxima é de 7.07 mm no modelo numérico e de 12.60 mm nos ensaios experimentais.

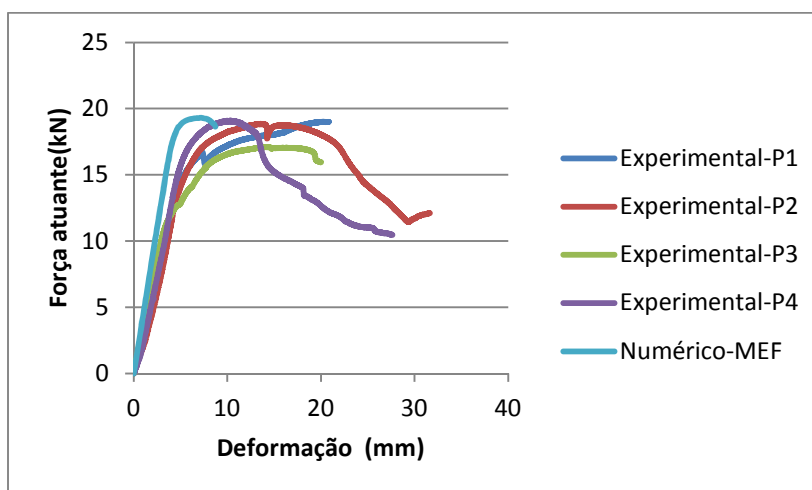


Figura 5-13: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão para o modelo numérico e ensaios experimentais, no perfil 90×1.5\_Fyy\_Furos.

Na Figura 5-14, apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, obtidas com o modelo numérico desenvolvido e com os ensaios experimentais realizados, em perfis sem aberturas, solicitados segundo o eixo de maior inércia e com carregamento no centro de corte da secção transversal, 90×1.5\_Fyy\_Liso. O provete P3, apresenta uma espessura de chapa saliente igual à do modelo numérico, com 14 mm. Os restantes provetes apresentam uma espessura de 4 mm. Por observação da Figura 5-14, constata-se que o modelo numérico apresenta uma perda acentuada da carga, logo após a carga máxima, sem qualquer zona de patamar. Pelo contrário, o provete P4 (proвете que apresenta a mesma espessura para a chapa saliente) apresenta uma zona de patamar, junto da carga máxima. A deformação correspondente à carga máxima é de 9.69 mm nos ensaios experimentais e de 3.93 mm no modelo numérico. Relativamente aos valores de carga máxima, constata-se uma diferença entre o modelo numérico e ensaios experimentais que é inferior a 10% (consultar Tabela 5-3). De

acordo com os aspetos referidos, verifica-se que possivelmente o modelo numérico não se encontra a funcionar corretamente na fase final do carregamento.

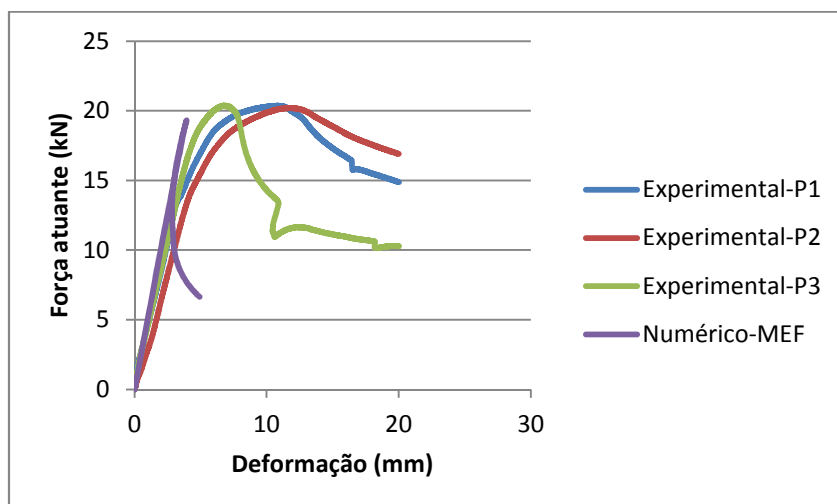


Figura 5-14: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão para o modelo numérico e ensaios experimentais, no perfil 90x1.5\_Fyy\_Liso.

Na Figura 5-15 encontram-se representados os modos de instabilidade para o modelo numérico e para o Provete P3. O provete P3 é aquele que apresenta o modo de instabilidade mais semelhante ao do modelo numérico. Os restantes dois provetes apresentam modos de instabilidade diferentes do numérico, com a zona condicionante a localizar-se junto da zona de aplicação de uma das cargas pontuais (consultar Tabela 4-9 do Capítulo 4).

Comparando os dois modos de instabilidade da Figura 5-15, verifica-se que ambos apresentam instabilidade ao nível do banzo de compressão, com deslocamentos para o interior do perfil, instabilidade da alma com deslocamentos para fora do plano e deslocamentos dos bordo de reforço para o interior do perfil. Ao contrário do modelo experimental, o modelo numérico apresenta simetria e observa-se a formação de um vinco ao nível do bordo de reforço e junto da chapa transversal, o que não acontece com o provete P3. No modelo numérico as cores observadas dizem respeito às tensões de Von Mises.

O modo de instabilidade global por flexão torção, visível no modelo numérico desenvolvido é também evidente em todos os ensaios experimentais (consultar Tabela 4-9 do capítulo 4).

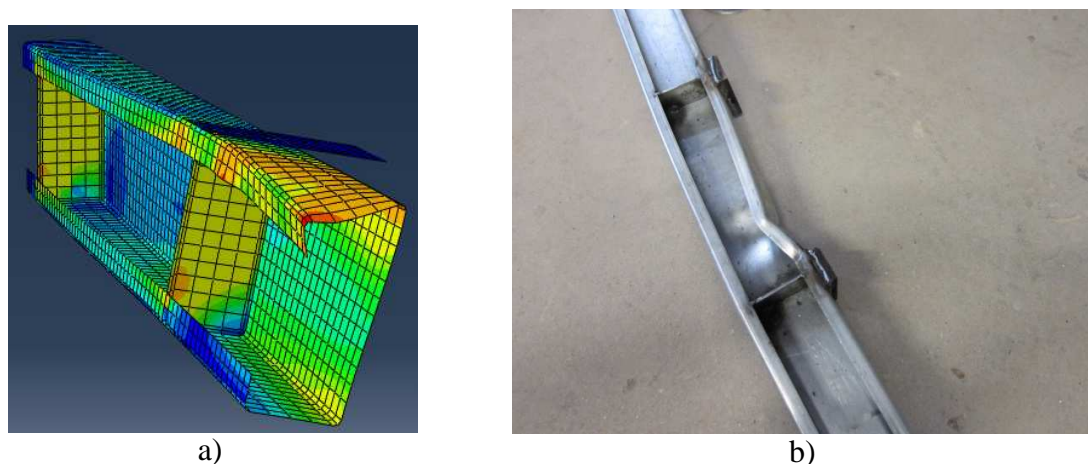


Figura 5-15: Modos de instabilidade relativos a 90x1.5\_Fyy\_Liso: a) modelo numérico e b) modelo experimental P3.

### 5.6.2 Modelos com solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração, z1

Na Figura 5-16 apresentam-se curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, obtidas com o modelo numérico desenvolvido e com os ensaios experimentais realizados, em perfis com aberturas, solicitados segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração, 90x1.5\_Fz1\_Furos. Constata-se que a deformação medida nos ensaios experimentais, até à carga máxima, é superior à registada no modelo numérico. O valor da deformação correspondente à carga máxima é de 14.83 mm no modelo numérico e 18.38 mm (valor médio) no modelo experimental. Nos valores de carga máxima constata-se diferenças inferiores a 10%. Também se observa que o valor da carga máxima obtida no modelo numérico é um pouco superior ao correspondente valor obtido no modelo experimental (ver Tabela 5-3).

Na Figura 5-17 constata-se que há concordância entre os modos de instabilidade obtidos no modelo numérico e nos ensaios experimentais. Ambos apresentam a formação de vincos, junto dos pontos de aplicação da carga e ao nível dos bordos de reforço apresenta também deslocamentos lateral das almas para o interior do modelo.

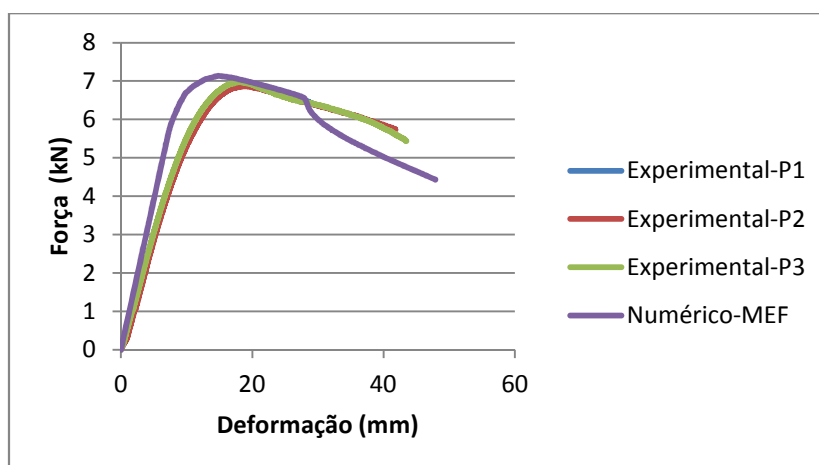


Figura 5-16: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão para o modelo numérico e ensaios experimentais, no perfil 90x1.5\_Fz1\_Furos.

Constata-se que o modelo numérico, apesar de não contabilizar as imperfeições geométricas e as tensões residuais, permitiu obter uma carga última e um modo de instabilidade que são muito próximos dos obtidos nos ensaios experimentais.

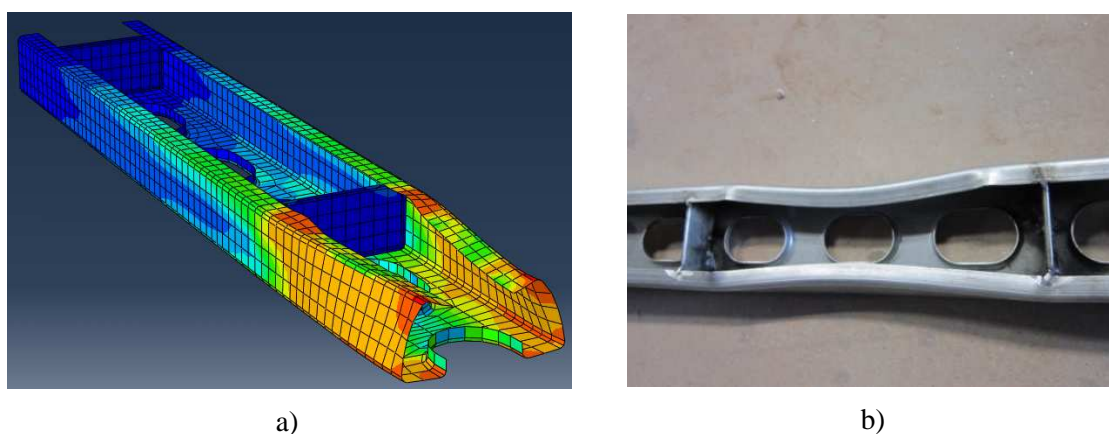


Figura 5-17: Modos de instabilidade relativos a 90x1.5\_Fz1\_Furos: a) modelo numérico e b) modelo experimental P2.

A Figura 5-18 apresenta as curvas que relacionam o valor da força aplicada com o valor da deformação na secção de meio vão, para o modelo numérico e para os ensaios experimentais realizados em perfis sem aberturas solicitados segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração, 90x1.5\_Fz1\_Liso. O valor da carga máxima obtida com o modelo numérico é próxima da carga máxima obtida nos ensaios experimentais, com uma diferença inferior a 10% (ver Tabela 5-3). No entanto, a deformação correspondente à carga máxima no modelo numérico é inferior à deformação obtida por via experimental, com 9.33 mm de deformação para o modelo numérico e 16.16 mm nos ensaios

experimentais. Pode-se também observar que a curva do modelo numérico, após a carga máxima apresenta valores de força atuante sempre inferiores aos experimentais.

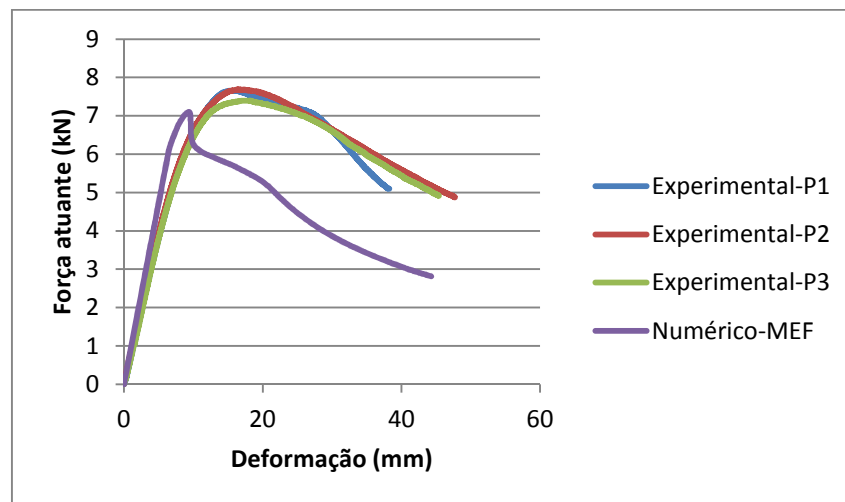


Figura 5-18: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão para o modelo numérico e ensaios experimentais, no perfil 90x1.5\_Fz1\_Liso.

O provete P1 correspondente aos ensaios experimentais é aquele que apresenta um modo de instabilidade mais próximo do modo de instabilidade obtido com o modelo numérico (ver Figura 5-19). Ambos apresentam deslocamentos das almas para o exterior, mas o modo de instabilidade do modelo numérico apresenta simetria, o que não acontece no modelo experimental. Quanto aos provetes P2 e P3 estes apresentam diferenças em relação ao modelo numérico, com deslocamento dos banzos em sentido oposto. Apresentam também a formação de vincos junto dos pontos de aplicação da carga e ao nível dos bordos de reforço, o que não é visível no modelo numérico.

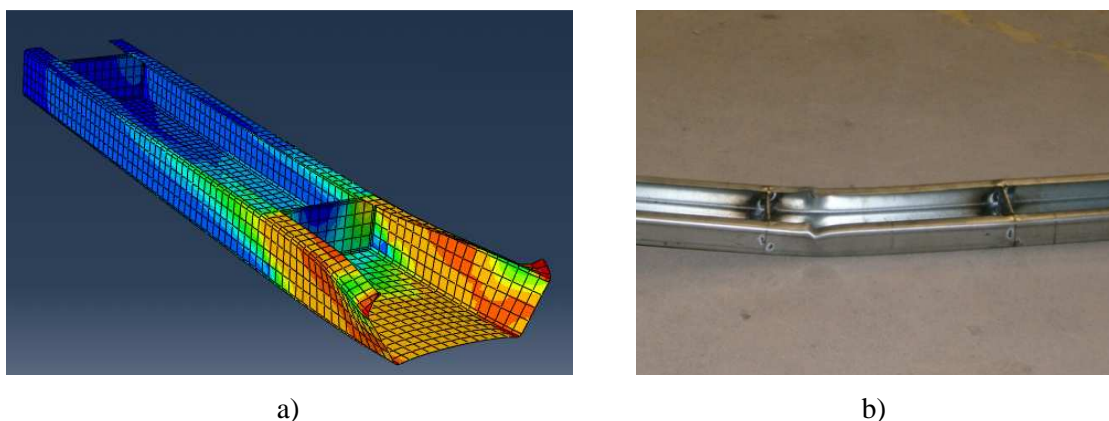


Figura 5-19: Modos de instabilidade relativos a 90x1.5\_Fz1\_Liso: a) modelo numérico e b) modelo Experimental P1.

### 5.6.3 Modelos com solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão, z2

Na Figura 5-20 apresentam-se as curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, obtidas com o modelo numérico desenvolvido e com os ensaios experimentais realizados, em perfis com aberturas, solicitados segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão, 90×1.5\_Fz2\_Furos. Constata-se que a deformação medida nos ensaios experimentais, até à carga máxima, é superior à deformação registada com o modelo numérico. O valor da deformação correspondente à carga máxima no modelo numérico é de 20.10 mm e a deformação média medida nos ensaios experimentais é de 27.09 mm. Relativamente às cargas máximas denotam-se valores semelhantes entre o modelo numérico e os ensaios experimentais (consultar Tabela 5-3).

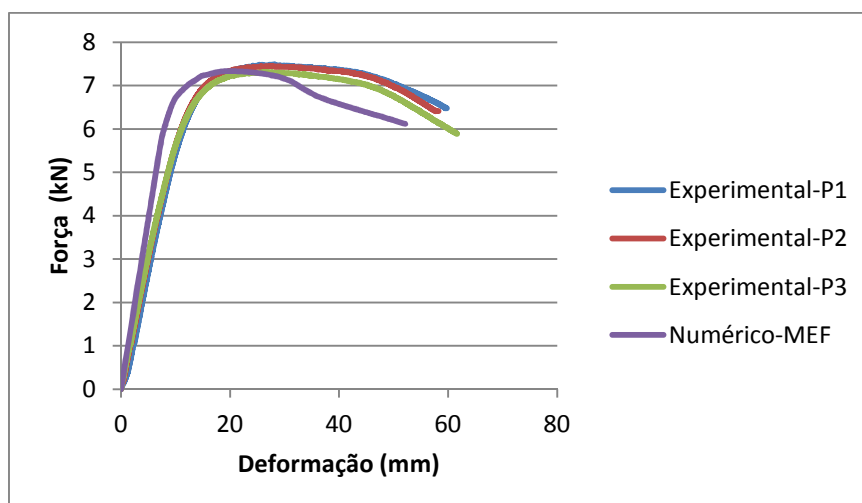


Figura 5-20: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão para o modelo numérico e ensaios experimentais, no perfil 90×1.5\_Fz2\_Furos.

Os modos de instabilidade observados no modelo numérico e nos ensaios experimentais são muito semelhantes, como se pode constatar através da Figura 5-21. Tal como nos ensaios experimentais, o modelo numérico apresenta simetria em relação ao modo de instabilidade. O modelo numérico desenvolvido permite identificar adequadamente o valor da carga última e o modo de instabilidade condicionante.



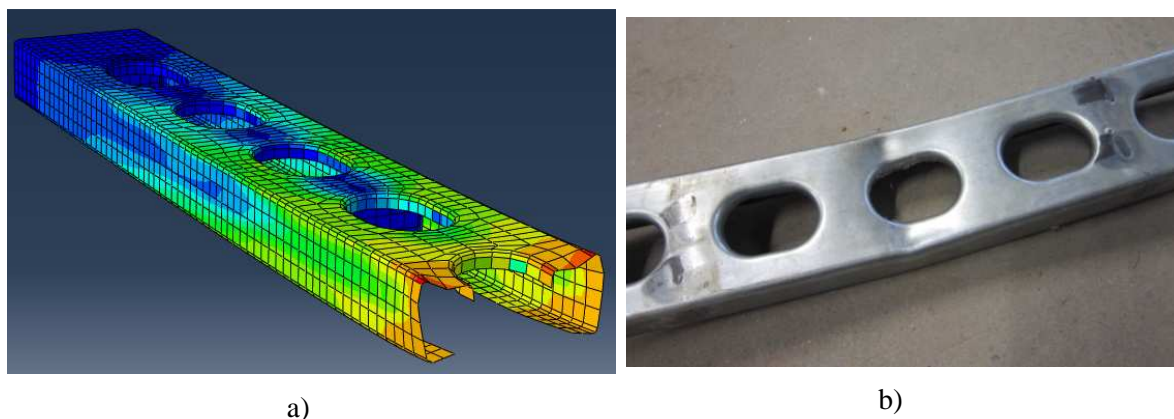


Figura 5-21: Modos de instabilidade relativos a 90×1.5\_Fz2\_Furos: a) modelo numérico e b) modelo experimental P2.

Na Figura 5-22 apresentam-se as curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, obtidas com o modelo numérico desenvolvido e com os ensaios experimentais realizados, em perfis sem aberturas, solicitados segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão, 90×1.5\_Fz2\_Liso. Neste caso, foi necessário fazer um estudo de variação da espessura da chapa considerada no modelo numérico desenvolvido, para que os resultados obtidos se aproximassem dos resultados obtidos nos ensaios experimentais. Deste modo, os resultados do modelo numérico apresentados dizem respeito a uma espessura de 1.55 mm, em vez de 1.5 mm correspondentes à espessura nominal da chapa. Os ensaios experimentais apresentam valores de deformação até à carga máxima superiores ao modelo numérico. Nos ensaios experimentais obtém-se uma deformação média para a carga máxima de 14.93 mm enquanto no modelo numérico se verificam 9.1 mm de deformação. Relativamente aos valores de carga máxima, registam-se diferenças inferiores a 10% entre o modelo numérico e os ensaios experimentais (ver Tabela 5-3).

Os modos de instabilidade obtidos no modelo numérico e nos ensaios experimentais são muito semelhantes, como se pode constatar através da Figura 5-23. Verifica-se, tal como nos ensaios experimentais, a simetria em relação ao modo de instabilidade. Mais uma vez, o modelo numérico desenvolvido permitiu identificar adequadamente a carga máxima e o modo de instabilidade condicionante.

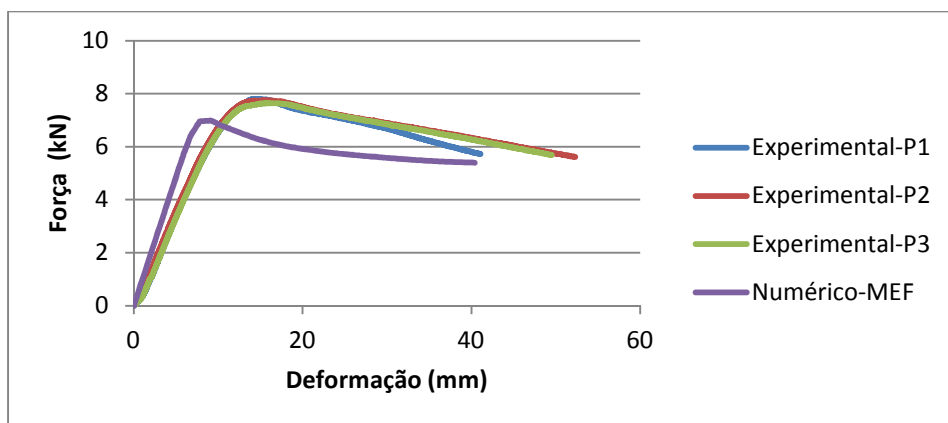
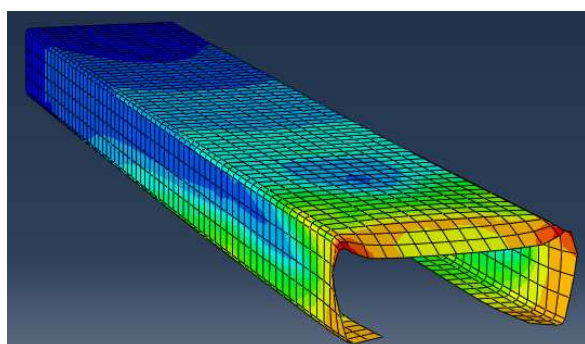


Figura 5-22: Relação entre força e deformação vertical na secção de meio vão para o modelo numérico e ensaios experimentais, no perfil 90x1.5\_Fz2\_Liso.



a)



b)

Figura 5-23: Modos de instabilidade relativos a 90x1.5\_Fz2\_Liso: a) modelo numérico e b) modelo Experimental P2.

Através da Tabela 5-3, consta-se que os rácios entre as cargas numéricas e as cargas médias experimentais são todos inferiores a 10%, o que revela que os modelos numéricos desenvolvidos permitiram determinar adequadamente as cargas máximas. A maior diferença observada, com o valor de 10%, corresponde ao modelo 90x1.5\_Fz2\_Liso.

Tabela 5-3: Cargas máximas obtidas nos modelos numéricos e nos ensaios experimentais.

Modelo	Valor médio da carga máxima-Modelo Experimental (kN)	Carga máxima-Modelo Numérico (kN)	Carga máxima numérica / Valor médio da carga máxima experimental
90x1.5_Fyy_Furos	18.53	19.30	1.04
90x1.5_Fyy_Liso	20.30	19.28	0.95
90x1.5_Fz1_Furos	6.91	7.14	1.03
90x1.5_Fz1_Liso	7.58	7.10	0.94
90x1.5_Fz2_Furos	7.42	7.34	0.99
90x1.5_Fz2_Liso	7.73	6.99	0.90

## 6. CONCLUSÕES

### 6.1 Considerações finais

Neste trabalho, foi analisado o comportamento estrutural de perfis metálicos enformados a frio com secção transversal em C e aberturas na alma.

Esta dissertação, para além da revisão bibliográfica, contempla três fases principais: o desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo analítica, com base em metodologias propostas na parte 1-3 do Eurocodigo 3, a avaliação experimental do comportamento à flexão de perfis enformados a frio com secção transversal em C e com aberturas na alma e uma simulação numérica usando o Software Abaqus que tem por base o Método dos Elementos Finitos.

A ferramenta de cálculo analítica permite a quantificação das características mecânicas de três secções transversais tipo: secção sem aberturas, secção com aberturas na alma e secção com aberturas e bordo reentrante ao longo das aberturas, submetidas a esforços de flexão e de compressão. A ferramenta permite quantificar as características da secção bruta e da secção efetiva. Os resultados obtidos através da simulação dos perfis em estudo na ferramenta desenvolvida, permitiram verificar que:

- ✓ Nas secções transversais sem aberturas e submetidas a compressão, todas as secções transversais dos perfis em estudo tiveram uma redução da secção, com a área efetiva,  $A_{eff}$ , inferior à área bruta,  $A_g$ . A propriedade efetiva que contribui para essa redução da secção transversal é a altura da alma,  $h_{ef}$ ;
- ✓ Nas secções transversais com aberturas e submetidas a compressão, também se verifica uma redução das secções transversais para todos os perfis em estudo (área efetiva,  $A_{eff}$ , inferior à área bruta,  $A_g$ ). Mais uma vez, a propriedade efetiva que contribui para a redução da secção transversal, é a altura de cada elemento que compõe a alma;
- ✓ Para as secções transversais com aberturas e bordos reentrantes ao longo das aberturas não existe redução das secções transversais, sendo a área bruta,  $A_g$ , igual à área efetiva,  $A_{eff}$ ;

- ✓ O esforço axial resistente dos perfis com secção transversal sem abertura é superior ao esforço axial resistente das secções transversais com aberturas, o que mostra que as aberturas nas almas das secções transversais em estudo afetam a sua capacidade resistente à compressão;
- ✓ O esforço axial resistente dos perfis de secção transversal com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura é superior ao esforço axial resistente das secções transversais sem abertura. Este aumento da capacidade resistente deve-se à presença do bordo reentrante ao longo da abertura que faz com a zona eficaz da secção transversal seja superior;
- ✓ Nas secções transversais sem abertura, submetidas a flexão, apenas a secção correspondente ao perfil EMC 300×2.5 apresenta redução da inércia; neste caso, a inércia da secção transversal efetiva,  $I_{eff,y}$ , é inferior à inércia bruta,  $I_{yg}$ ;
- ✓ Nas secções transversais com aberturas submetidas a flexão, verifica-se que todas as secções transversais em estudo apresentam redução da inércia, com a inércia da secção transversal efetiva,  $I_{eff,y}$  inferior à inércia bruta,  $I_{yg}$ . A altura efetiva referente ao elemento da alma,  $h_{ef}$ , corresponde à propriedade efetiva que contribui para a redução da inércia;
- ✓ Nas secções transversais com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, submetidas a flexão, a inércia da secção efetiva é igual à inércia da secção bruta;
- ✓ O momento resistente das secções transversais sem abertura é, em todos os perfis em estudo, superior ao momento resistente das secções transversais com aberturas. Deste modo, a presença de aberturas simples nestas secções transversais diminui a sua capacidade resistente à flexão;
- ✓ O momento resistente das secções transversais com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura é superior ao momento das secções transversais com abertura.

A ferramenta de cálculo analítica possibilita também a quantificação do esforço transversal resistente para uma secção transversal sem aberturas.

Na avaliação experimental, estudaram-se solicitações à flexão segundo o eixo de maior inércia  $yy$ , e também segundo o eixo de menor inércia com banzo maior à tração e à compressão,  $z1$  e  $z2$ . Esta campanha abordou os perfis do tipo EMC 90×1.5 e EMC

150×1.5, sem aberturas na alma e com aberturas e bordo reentrante ao longo da abertura.

Nos ensaios com solicitação segundo o eixo de maior inércia destaca-se que;

- ✓ Sugiram dificuldades na interpretação dos modos de instabilidade locais;
- ✓ Nos ensaios dos provetes de tipo 90×1.5\_Fyy\_Furos e 90×1.5\_Fyy\_Liso, observou-se o modo de instabilidade global por flexão-torção, o modo de instabilidade local de placa e o modo de instabilidade distorcional. O modo distorcional só é visível nos provetes com espessura de 14 mm na chapa saliente;
- ✓ A presença das aberturas na alma condicionou a capacidade resistente dos provetes do tipo 90×1.5\_Fyy\_Furos, porque estes apresentaram menor carga máxima e maior deformação a meio vão, quando comparados com os provetes do tipo 90×1.5\_Fyy\_Liso;
- ✓ Nos ensaios dos provetes de tipo 150×1.5\_Fyy\_Furos e 150×1.5\_Fyy\_Liso observou-se o modo de instabilidade global por flexão-torção e o modo de instabilidade local de placa;
- ✓ A presença das aberturas na alma também condicionou a capacidade resistente dos provetes do tipo 150×1.5\_Fyy\_Furos, porque estes apresentaram menor carga máxima e maior deformação a meio vão, quando comparados com os provetes de tipo 150×1.5\_Fyy\_Liso.

Nos ensaios com solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à tração, destaca-se que:

- ✓ Nos provetes de tipo 90×1.5\_Fz1\_Furos e tipo 90×1.5\_Fz1\_Liso, observou-se o modo de instabilidade local de placa e o modo distorcional;
- ✓ A presença das aberturas na alma condicionou a capacidade resistente dos provetes do tipo 90×1.5\_Fz1\_Furos, porque estes apresentaram menor carga máxima e maior deformação a meio vão, quando comparados com os provetes de tipo 90×1.5\_Fz1\_Liso;
- ✓ Nos ensaios de 150×1.5\_Fz1\_Furos e 150×1.5\_Fz1\_Liso os modos de instabilidade observados foram novamente o modo de instabilidade local de placa e o modo distorcional;
- ✓ Nos provetes de tipo 150×1.5\_Fz1\_Liso e tipo 150×1.5\_Fz1\_Furos, as cargas máximas são próximas, mas a deformação é maior nos perfis com aberturas;
- ✓ Não se observou o modo de instabilidade global por flexão-torção.

Nos ensaios com solicitação segundo o eixo de menor inércia e banzo maior à compressão destaca-se que:

- ✓ Em todos os provetes do tipo 90×1.5\_Fz2\_Furos, 90×1.5\_Fz2\_Liso, 150×1.5\_Fz2\_Furos e 150×1.5\_Fz2\_Liso observou-se o modo de instabilidade local de placa;
- ✓ A presença de aberturas na alma condicionou a capacidade resistente dos provetes do tipo 90×1.5\_Fz2\_Furos, porque estes apresentaram menor carga máxima e maior deformação a meio vão, quando comparados com os provetes de tipo 90×1.5\_Fz2\_Liso;
- ✓ Nos ensaios dos provetes de tipo 150×1.5\_Fz2\_Liso e tipo 150×1.5\_Fz2\_Furos, as cargas máximas são próximas, mas com deformação maior nos perfis com aberturas.
- ✓ Não se observou o modo de instabilidade global por flexão-torção.

Para os três tipos de solicitação estudadas (solicitação segundo o eixo de maior inércia e solicitação segundo o eixo de menor inércia com banzo maior à tração e à compressão), tanto nos perfis com secção transversal sem aberturas como nos perfis com secção transversal com aberturas e bordo reentrante ao longo das aberturas, observaram-se diferenças significativas entre as inércias analíticas e as inércias experimentais, obtidas em regime elástico.

Na simulação numérica realizada utilizou-se o Software Abaqus, que tem por base o Método dos Elementos Finitos. São realizadas simulações dos perfis EMC 90×1.5 sem aberturas e EMC 90×1.5 com aberturas e bordo reentrante ao longo da abertura, submetidos à flexão, num total de 6 modelos. Nestas análises considerou-se a não linearidade material e geométrica. Nos modelos desenvolvidos destaca-se que:

- ✓ Os rácios entre as cargas máximas obtidas por via numérica e as cargas máximas obtidas por via experimental são todos inferiores a 10%, o que revela que os modelos numéricos desenvolvidos permitiram determinar adequadamente as cargas máximas;

- ✓ No modelo de tipo 90×1.5\_Fyy\_Furos, devido a problemas com a convergência não foi possível obter a totalidade da curva que relaciona a força aplicada com a deformação vertical e o modo de instabilidade;
- ✓ No modelo de tipo 90×1.5\_Fyy\_Liso, verifica-se que o provete P3 apresenta um modo de instabilidade semelhante ao do modelo numérico. Relativamente à curva do modelo numérico que relaciona a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, constata-se uma perda de carga acentuada logo após a carga máxima, ao contrário do que acontece nas curvas experimentais;
- ✓ Nos modelos dos tipos 90×1.5\_Fz1\_Furos, 90×1.5\_Fz2\_Furos e 90×1.5\_Fz2\_Liso constata-se que há concordância entre os modos de instabilidade obtidos nos modelos numéricos e nos ensaios experimentais;
- ✓ No modelo 90×1.5\_Fz1\_Liso, o provete P1 correspondente aos ensaios experimentais é aquele que apresenta um modo de instabilidade mais próximo do modo de instabilidade obtido com o modelo numérico;
- ✓ Através das curvas que relacionam a força aplicada com a deformação vertical na secção de meio vão, obtidas com os modelos numéricos e com os ensaios experimentais realizados, constata-se que a deformação medida nos ensaios experimentais, desde o início do carregamento e até à carga máxima, é superior à registada nos modelos numéricos.

## 6.2 Desenvolvimentos futuros

O estudo desenvolvido nesta dissertação foi realizado com o objetivo de analisar o comportamento de perfis metálicos enformados a frio com secção transversal em C e aberturas na alma. Este estudo pode ser complementado de várias formas:

- ✓ Proceder a uma validação externa da ferramenta de cálculo analítico, para a secção transversal com abertura e para a secção transversal com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura, quando submetidas a esforços de compressão e de flexão segundo o eixo de maior inércia.
- ✓ Desenvolver metodologias com base na EN 1993-1-3, para a quantificação das características mecânicas e a capacidade resistente das secções transversais estudadas (secção sem abertura, secção com abertura e secção com abertura e

bordo reentrante ao longo da abertura), quando submetidas a esforços de flexão segundo o eixo de menor inércia;

- ✓ Desenvolver metodologias com base na EN 1993-1-3, para a determinação do esforço transversal resistente, das seguintes secções transversais: secção transversal com abertura e secção transversal com abertura e bordo reentrante ao longo da abertura;
- ✓ Estudar o comportamento destes perfis metálicos quando submetidos a esforços de corte, compressão e flexão desviada. Nesta dissertação apenas foi abordada a flexão simples, tanto do ponto de vista experimental, como no desenvolvimento de modelos numéricos;
- ✓ Considerar os efeitos das imperfeições geométricas iniciais e das tensões residuais nos modelos numéricos desenvolvidos;
- ✓ Melhorar o modelo numérico correspondente ao perfil 90×1.5\_Fyy\_Furos, uma vez que não se obteve a totalidade da curva que relaciona força com a deformação, nem o modo de instabilidade condicionante;
- ✓ Melhorar o modelo numérico correspondente ao perfil 90×1.5\_Fyy\_Liso nomeadamente na curva que relaciona a força com a deformação;
- ✓ Estabelecer orientações gerais para a construção de modelos numéricos de perfis enformados a frio com secção em C e com as características dos perfis analisados nesta dissertação.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abaqus 6.11 (2011). *Abaqus/CAE User's Manual*. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.

Abaqus 6.11 (2011). *Getting Started With Abaqus: Interactive Edition*. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.

Almeida, T.S. (2009). *Sistemas de Armazenagem Autoportante em Perfis Enformados a Frio*. (Dissertação de Mestrado). Universidade de Aveiro - Departamento de Engenharia Civil, (pp. 48).

American Iron and Steel Institute (1946). *Specification for the Design of Light Gauge Steel Structural Members*. New York.

Camotim, D. & Dinis, P.B. (2011). *Coupled instabilities with distortional buckling in cold-formed steel lipped channel columns*. Thin walled structures, vol. 49, (pp. 1461-1474).

Davies, J.M. & Leach, P. (1994). *First-Order Generalised Beam Theory*. Journal of Constructional Steel Research, vol. 31, (pp. 187-220).

Davies, J.M. (2000). *Light gauge construction: developments in applications*. In P.G. Hancock, Progress in Structural Engineering and Materials. University of Manchester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, (pp. 26-33).

Davies, J.M. (2000). *Recent research advances in cold-formed steel structure*. Journal of Constructional Steel Research, vol. 55, (pp. 267-288).

Davies, J.M., Leach, P. & Taylor, A. (1997). *The Design of Perforated Cold-Formed Steel Sections Subject to Axial Load and Bending*. Thin-Walled Structures vol. 29. Great Britain, (pp. 141-157).

Dinis, P.B., Camotim, D. & Silvestre, N. (2007). *FEM-based analysis of the local-plate/distortional mode interaction in cold-formed steel lipped channel columns*. Computers and Structures, vol. 85, (pp.1461-1474).

ECCS Technical Committee 7 Cold-formed Steel (2008). *Worked examples according to EN 1993-1-3*. ECCS-European Convention for Constructional Steelwork, N°123, 1<sup>st</sup> edition.

EN 1993-1-3 (2006). *Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-3: General rules Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*. CEN, European Committee for standardization, Brussels, Belgium.

Gervásio, H., Silva, L.S. & Simão, P. (2003). *Dimensionamento de Elementos Metálicos com Perfis Enformados a Frio de Acordo com a Parte 1.3 do Eurocodigo 3*. Congresso de Construção Metálica e Mista, (pp. 400-408).

Gherzi, A., Landolfo, R. & Mazzolani, F. (2002). *Design of Metallic Cold-formed Thin-walled Members*. London and New York: Spon Press Taylor & Francis Group.

Hancock, G.J., Murray, T.M. & Ellifritt, D.S. (2001). *Cold-Formed Steel Structures to the AISI Specification*. New York: Marcel Dekker, Inc, (pp. 1-23).

NP EN 10 002-1 (1990). *Materiais metálicos – Ensaio de tracção. Parte 1: Método de ensaio (à temperatura ambiente)*. CEN, Comité Europeu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.

NP EN 1993-1-1 (2010). *Eurocode 3 – Projecto de estruturas de aço – Parte 1-1:Regras gerais e regras para edifícios*. CEN, Comité Europeu de Normalização, Bruxelas, Bélgica.

Pham, C.H. & Hancock, G.J. ( 2010). *Numerical Simulation of High Strength Cold-Formed Purlins in Combined Bending and Shear*. Journal of Constructional Steel Research, vol. 66, (pp. 1205-1217).

prEN 1993-1-5 (2004). *Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1.5: Plated structural elements*. CEN, European Committee for standardization, Brussels, Belgium.

Prola, L.C. (2001). *Estabilidade Local e Global de Elementos de Aço Enformados a Frio*. (Tese de Doutoramento). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Reis, A. & Camotim, D. (2001). *Estabilidade Estrutural*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, MCGRAW-HILL – ISBN: 972-773-036-1.

Reis, A.C., Farinha, M.B. & Farinha, J.P. (2010). *Tabelas Técnicas*. Edições Técnicas E.T.L., L.

Roure, F., Pastor, M.M., Casafont, M. & Somalo, M.R. ( 2011). *Stub column tests for racking design: Experimental testing, FE analysis and EC3*. Thin-Walled Structures, vol. 49, (pp. 167-184).

Schafer, B.W., Li, Z. & Moen, C.D. (2010). *Computational modeling of cold-formed steel*. Thin-Walled Structures, vol. 48, (pp. 752-762).

Silva, R.C. (1995). *Fundamentos Teóricos e Aspectos Gerais para Projetos de Estruturas em Aço com Perfis Conformados a Frio*. (Dissertação de Mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos, Brazil, (pp.19-22).

Silvestre, N. & Camotim, D. (2006). *Comportamento de Estruturas de Aço Enformadas a Frio e Dimensionamento de acordo com o EC3-1-3*. LSK Jornada Técnica, Porto.

Szabo, I.F. & Dubina, D. (2004). *Recent research advances on the ECBL approach. Part II: interactive buckling of perforated sections*. Thin-Walled Structures, vol. 42, (pp. 195-210).

Veríssimo, H.A. (2008). *Dimensionamento de elementos estruturais de aço enformados a frio de acordo com o Eurocódigo 3*.(Dissertação de Mestrado). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

Wang, H. & Zhang, Y. ( 2009). *Experimental and numerical investigation on cold-formed steel C-section flexural members*. Journal of Constructional Steel Research, vol. 65, (pp. 1225-1235).

## **SITES CONSULTADOS**

Futureng, (2012). Acesso em Março de 2012 URL <http://www.futureng.pt/>

Perfisa, (2012). Catálogo perfis metálicos. Acesso em Março de 2012 URL [http://www.perfisa.net/ficheiros/catalogos/cat\\_estruturais.pdf](http://www.perfisa.net/ficheiros/catalogos/cat_estruturais.pdf)

Perfitec, (2012). Catálogo perfitec revestimentos metálicos. Acesso em Março de 2012 URL [http://www.perfitec.pt/galeria/paginas/MADRES\\_LOWres.pdf](http://www.perfitec.pt/galeria/paginas/MADRES_LOWres.pdf)

## ANEXOS

### Anexo A: Propriedades efetivas da secção transversal

Neste Anexo A procura-se expor metodologias propostas EN 1993-1-3, para a quantificação das propriedades efetivas da secção transversal, atendo ao modo de instabilidade local de placa (calculado das larguras efetivas) e ao modo de instabilidade distorcional (o calculo de espessuras reduzidas).

#### Anexo A1: Metodologias para a determinação das larguras efetivas - modo de instabilidade local de placa

As propriedades efetivas da secção transversal são obtidas a partir das larguras efetivas de cada elemento que compõem a secção transversal, e da espessura efetiva do bordo de reforço comprimido. De acordo com a cláusula 5.5.3.2 (3) etapa 1, as larguras efetivas dos elementos que compõem a secção transversal (ver Figura A1-1) são dadas na Tabela A1-1e na Tabela A1-2. Se o banzo exterior for reforçado e apenas para reforço simples, tal como, o caso das secções transversais em estudo a largura efetiva é dada pela equação (A1-1).

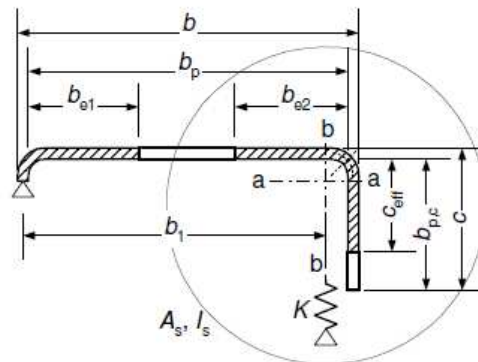


Figura A1-1: Reforço de bordo simples (EN 1993-1-3, 2006).

$$c_{eff} = \rho \times b_{p,c} \quad (A1-1)$$

Tabela A1-1: Elementos internos à compressão, adaptado ao prEN 1993-1-5 (2004).

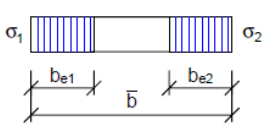
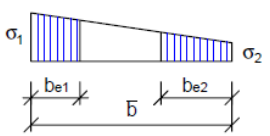
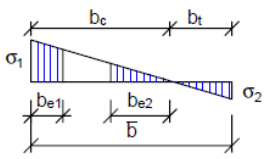
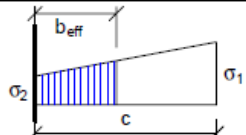
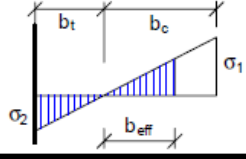
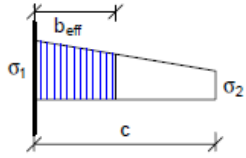
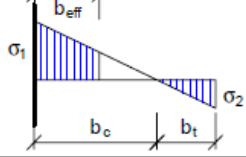
Distribuição de tensões (compressão positiva)				Largura efetiva P: $b_{eff}$		
				$\underline{\psi = 1:}$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$\underline{1 > \psi \geq 0:}$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff} \quad b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\underline{\psi < 0:}$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff} \quad b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Fator de encurvadura $k_\sigma$	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Tabela A1-2: Elementos externos à compressão, adaptado ao prEN 1993-1-5 (2004).

Distribuição de tensões (compressão positiva)				Largura efetiva P: $b_{eff}$		
				$\underline{1 > \psi \geq 0:}$ $b_{eff} = \rho c$		
				$\underline{\psi < 0:}$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$		
Fator de encurvadura $k_\sigma$	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$		
				$\underline{1 > \psi \geq 0:}$ $b_{eff} = \rho c$		
				$\underline{\psi < 0:}$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	
Fator de encurvadura $k_\sigma$	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8	

O coeficiente de encurvadura  $k_\sigma$ , em função do parâmetro  $\psi$  de distribuição de tensões do elemento obtém-se a partir da Tabela A1-1 e da Tabela A1-2, apenas no caso de elementos internos à compressão (exemplo a alma) e elementos externos à compressão

(exemplo o banzo). No caso do banzo exterior ser reforçado com reforço simples, o coeficiente de encurvadura é dada pela equação (A1-2).

$$k_{\sigma} = 0.5 \quad \text{Se } \frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0.35$$

$$k_{\sigma} = 0.5 + 0.83 \times \sqrt[3]{(b_{p,c}/b_p - 0.35)^2} \quad \text{Se } 0.35 < \frac{b_{p,c}}{b_p} \leq 0.60$$
(A1-2)

O coeficiente de redução  $\rho$  que tem em conta o comportamento pós-encurvadura, é obtido a partir de:

- Elementos internos à compressão;

$$\rho = 1 \quad \text{se } \bar{\lambda}_p \leq 0.673$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.055 \times (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \quad \text{Se } \bar{\lambda}_p \geq 0.673, \text{ onde } (3 + \psi) \geq 0$$
(A1-3)

-Elementos externos à compressão;

$$\rho = 1 \quad \text{se } \bar{\lambda}_p \leq 0.748$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0.188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1 \quad \text{Se } \bar{\lambda}_p \geq 0.748$$
(A1-4)

Sendo o coeficiente de esbelteza dado pela equação (A1-5):

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28.4 \times \varepsilon \times \sqrt{k_{\sigma}}}$$
(A1-5)

Onde,

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (f_y \text{ em MPa})$$
(A1-6)

## Anexo A2: Metodologias para a determinação da espessura reduzida - modo de instabilidade distorcional

Para a quantificação das espessuras reduzidas é necessário calcular em primeiro lugar as larguras efetivas. Após o cálculo das larguras efetivas, o reforço é então composto pelo reforço de bordo e pela parte efetiva do banzo junto do reforço de bordo (ver Figura A1-1).

A tensão de encurvadura distorcional é dada pela equação (A2-1), em que  $I_s$  é o segundo momento de inércia efetivo do reforço, obtido a partir da área efetiva e relativamente ao eixo que passa no seu centro de gravidade, e  $k$  é a rigidez da mola por unidade de comprimento. O cálculo desta tensão baseia-se na encurvadura por flexão do reforço. Assume-se que o banzo está restringido parcialmente ao deslocamento vertical na extremidade reforçada e à rotação junto da alma. Esta restrição é simulada por intermédio de uma mola (ver Figura A2-1), a qual depende das condições de apoio e da rigidez dos elementos adjacentes.

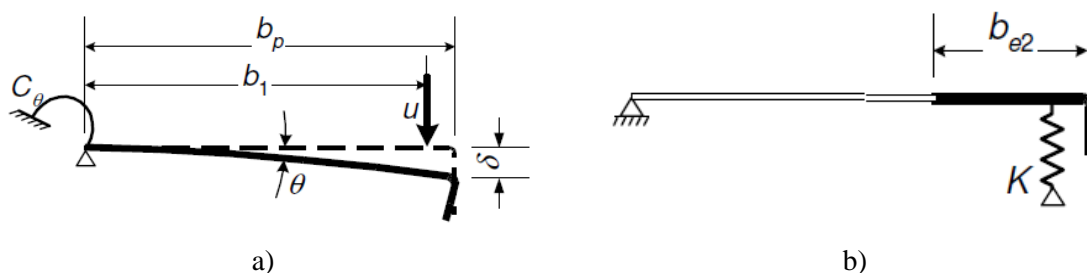


Figura A2-1: Determinação da rigidez da mola (EN 1993-1-3, 2006): a) sistema real e b) sistema equivalente.

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \times \sqrt{KEI_s}}{A_s} \quad (A2-1)$$

Para o caso de secções em C e Z, reforçadas, o valor da rigidez da mola para o banzo 1  $k_1$  é dado pela equação (A2-2).

$$k_1 = \frac{E \times t^3}{4(1 - \nu^2) \times (b^2 h_w + b_1^3 + 0.5 b_1 b_2 h_w k_f)} \quad (A2-2)$$



Em que,

$h_w$  é a altura da alma;

$b_1$  e  $b_2$  correspondem à distância da concordância entre o banzo e a alma até ao centro de gravidade do reforço ( com a área efetiva), ver Figura A2-1;

$k_f$  é a relação entre as áreas efetivas dos banzos , toma o valor de 1 para secções simétricas à compressão e o valor de 0 se o banzo 2 estiver tracionado.

O coeficiente de redução da espessura de reforço  $\chi_d$  é obtido a partir da esbelteza relativa, de acordo com a equação (A2-3).

$$\begin{aligned} \chi_d &= 1 & \text{Se } \overline{\lambda}_d \leq 0.65 \\ \chi_d &= 1.47 - 0.723\overline{\lambda}_d & \text{Se } 0.65 < \overline{\lambda}_d < 1.38 \\ \chi_d &= \frac{0.66}{\overline{\lambda}_d} & \text{Se } \overline{\lambda}_d \geq 1.38 \end{aligned} \quad (\text{A2-3})$$

Onde o coeficiente da esbelteza relativa é dado pela equação (A3-4).

$$\overline{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{yb}}{\sigma_{cr,s}}} \quad (\text{A3-4})$$

No caso de  $\chi_d < 1$ , o valor do coeficiente de redução da espessura de reforço pode ser refinado iterativamente, até que o valor encontrado seja aproximadamente igual ou inferior, ao valor anterior.

A espessura reduzida do reforço  $t_{red}$  obtém-se a partir da equação (A2-5), que depende da área efetiva reduzida  $A_{s,red}$  dada pela equação (A2-6).

$$t_{red} = \frac{A_{s,red}}{A_s} \quad (\text{A2-5})$$

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_{yb}/\gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} \quad (\text{A2-6})$$